

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroniky

Analogové násobičky a jejich aplikace
Analog Multipliers and Applications

Zadání bakalářské práce

Student:

Jan Prášil

Studijní program:

B0714A060012 Aplikovaná elektronika

Téma:

Analogové násobičky a jejich aplikace
Analog Multipliers and Applications

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

1. Stručně popište problematiku násobení analogových signálů, specifikujte vlastnosti násobiček dostupných ve formě integrovaných obvodů
2. Proveďte návrh základních aplikačních zapojení s analogovou násobičkou
3. Vybraná zapojení realizujte ve formě laboratorní úlohy a měření ověřte jejich správnou činnost
4. K realizovaným zapojením vytvořte sylaby

Seznam doporučené odborné literatury:


- BRANČÍK, L., DOSTÁL, T.: Analogové elektronické obvody. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2007. 124 s. ISBN 978-80-214-3525-4
- Multiplier Application Guide. Analog Devices 1978, ROUTE ONE INDUSTRIAL PARK NORWOOD, MASSACHUSETTS

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Tomáš Pavelek, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2019

Datum odevzdání: 30.04.2020


doc. Ing. Petr Palacký, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.
děkan fakulty

Poděkování:

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Tomáši Pavelkovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc při zpracování mé bakalářské práce.

V Ostravě dne 15. 5. 2020

Prášil Jan
jméno a příjmení studenta

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne 15. 5. 2020

Prášil Jan
jméno a příjmení studenta

Abstrakt

V bakalářské práci se v teoretické části zaměřím na rozdělení analogových násobiček podle pracovního kvadrantu a způsobů analogového násobení, poté specifikuji vlastnosti násobiček dostupných ve formě integrovaných obvodů. Dále vyberu jeden z dostupných integrovaných obvodu, s kterým provedu návrh základních aplikačních zapojení.

V praktické části budu realizovat vybrané zapojení ve formě laboratorní úlohy, následně ověřím jejich správnou činnost a k realizovaným zapojením vytvořím sylaby.

Klíčová slova

Analogová násobička, analogové násobení, analogové dělení, kvadrátor, odmocnina, AD633JN, UA741CP, AD711CN

Abstract

In the bachelor's thesis, in the theoretical part I will focus on the distribution of analog multipliers according to the working quadrant and methods of analog multiplication, then I specify the properties of multipliers available in the form of integrated circuits. Next, I will select one of the available integrated circuits with which I will design basic application connections. In the practical part, I will implement the selected involvement in the form of a laboratory task, after that I will verify of their correct operation and create syllabuses for the realized connections.

Key words

Analog multiplier, analog multiplication, analog division, quadrant, square root, AD633JN, UA741CP, AD711CN

OBSAH

1	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	2
2	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	3
3	SEZNAM TABULEK	5
4	ÚVOD.....	6
5	TEORETICKÝ ROZBOR ANALOGOVÝCH NÁSOBIČEK	7
5.1	ROZDĚLENÍ NÁSOBIČEK – PODLE PRACOVNÍHO KVADRANTU.....	7
5.2	ROZDĚLENÍ NÁSOBIČEK – PODLE ZPŮSOBU ANALOGOVÉHO NÁSOBENÍ.....	8
5.2.1	Analogová násobička s logaritmickými zesilovači.....	9
5.2.2	Analogová násobička s rozdělením proudů	11
5.2.3	Analogová násobička s šířkově-pulsní modulací.....	15
5.3	VLASTNOSTI KOMERČNĚ DOSTUPNÝCH NÁSOBIČEK VE FORMĚ IO.....	16
5.3.1	Vlastnosti obvodu AD633	17
5.3.2	Vlastnosti obvodu AD734	18
5.3.3	Vlastnosti obvodu AD834	19
5.3.4	Vlastnosti obvodu AD835	21
5.4	APLIKACE ANALOGOVÝCH NÁSOBIČEK.....	22
5.4.1	Aplikace IO AD633 – Násobení.....	22
5.4.2	Aplikace IO AD633 - Kvadrátor.	23
5.4.3	Aplikace IO AD633 – Dělička s invertujícím zapojením OZ.....	24
5.4.4	Aplikace IO AD633 – Odmocnina s invertujícím zapojením OZ.....	26
5.4.5	Aplikace IO AD633 – Dělička s neinvertujícím zapojením OZ.....	28
5.4.6	Aplikace IO AD633 – Odmocnina s neinvertujícím OZ	30
5.5	ZVÝŠENÍ PŘESNOSTI NAVRŽENÝCH ZAPOJENÍ	32
5.5.1	Zvýšení přesnosti IO AD633JN.....	32
5.5.2	Chyby způsobené OZ	32
6	PRAKTICKÁ ČÁST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE.....	34
6.1	NÁVRH PRAKTICKÉ REALIZACE	34
6.2	OVĚŘENÍ SPRÁVNÉ ČINNOSTI NAVRŽENÝCH APLIKAČNÍCH ZAPOJENÍ	35
6.2.1	Převodní charakteristiku obvodu násobení $U_3 = f(U_2)$	35
6.2.2	Převodní charakteristiku kvadrátoru $U_3 = f(U_1)$	36
6.2.3	Převodní charakteristika děličky s invertujícím zapojením OZ $U_6 = f(U_5)$	37
6.2.4	Převodní charakteristika odmocniny s invertujícím zapojením OZ $U_6 = f(U_4)$	39
6.2.5	Změřené výstupní zbytkové napětí násobičky U_3 při $U_1 = U_2 = 0V$	40
6.2.6	Změřený fázový posun mezi vstupním a výstupním napětím.....	40
6.2.7	Změřená odchylka při násobení výstupního napětí U_3 od vypočteného výstupního napětí U_{3vyp} v procentech, při $U_1 = \pm 10V$ a $U_2 = 10V$. Vykreslená charakteristika $\delta = f(U_1)$	41
6.2.8	Frekvenční charakteristiky – amplitudová a fázová	42
7	ZÁVĚR.....	44
8	LITERATURA	45
9	SEZNAM PŘÍLOH	46

1 Seznam použitých symbolů a zkratek

Seznam použitých symbolů

B	(Hz)	šířka pásma
F_D	(Hz)	dolní mezní kmitočet
f_H	(Hz)	horní mezní kmitočet
I_c	(A)	kolektorový proud
I_{IB0}	(A)	vstupní klidový proud
I_{I0}	(A)	vstupní proudová nesymetrie
I_s	(A)	nasycený proud přechodu báze emitör pro tranzistory v diodovém zapojení
K	(A)	konstanta závislá na hodnotách tranzistoru
k	$\left(\frac{J}{K}\right)$	Boltzmanova konstanta, $k = 1.38062 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K}$
q	(C)	hodnota náboje elektronu, $q = 1.60219 \cdot 10^{-19} C$
SVR	(dB)	potlačení vlivu změn napájecího napětí
T	(K)	absolutní teplota
U_{BE}	(V)	napětí báze emitör
U_{I0}	(V)	vstupní napěťová nesymetrie
αU_{I0}	$\left(\frac{\mu V}{^{\circ}C}\right)$	teplotní drift napěťové nesymetrie
U_T	(V)	thermal voltage – tepelné napětí, $U_T = \frac{kT}{q}$
δ	(%)	Odchylka při násobení udávaná v procentech

Seznam použitých zkratek

A/D	Analogově/Digitální převodník
CERDIP	CERAmic Dual Inline Package – Keramické pouzdro IO s dvěma řadami pinů
D/A	Digitálně/Analogový převodník
DC	Direct Current – stejnosměrný proud
DIP	Dual Inline Package – Pouzdro IO s dvěma řadami pinů
DPS	Deska Plošného Spoje
DSP	Digitální Signálový Procesor
GND	GrouND – zemnicí svorka
I/U	převodník z proudu (I) na napětí (U)
IO	Integrovaný Obvod
OZ	Operační Zesilovač
PDIP	Plastic Dual Inline Package – Plastové pouzdro IO s dvěma řadami pinů
RMS	Root Mean Square – Efektivní hodnota
SOIC	Small Outline Integrated Circuit – Pouzdro IO pro povrchovou montáž
U/I	převodník z napětí (U) na proud (I)
ZD	Zenerova Dioda

2 Seznam obrázků

Obr. 1 Blok analogové násobičky.[2]	7
Obr. 2 Pracovní kvadranty analogových násobiček.....	8
Obr. 3 Jednokvadrantová tepelně kompenzovaná logaritmická analogová násobička.[11]	10
Obr. 4 Čtyřkvadrantová tepelně kompenzovaná logaritmická analogová násobička.[11].....	10
Obr. 5 Princip metody rozdělení proudů.[1].....	11
Obr. 6 Gilbertova buňka.[1]	13
Obr. 7 Čtyřkvadrantová násobička s rozdělením proudů.[2].....	14
Obr. 8 Blokové schéma šířkově-impulsní násobičky.[11].....	15
Obr. 9 Časové průběhy u_T , u_S . [11]	16
Obr. 10 Funkční blokový diagram integrovaného obvodu AD633.[3].....	17
Obr. 11 Integrovaný obvod AD633 v pouzdře DIP.[3]	17
Obr. 12 Integrovaný obvod AD734 v pouzdře DIP.[4]	18
Obr. 13 Funkční blokový diagram integrovaného obvodu AD734.[4].....	19
Obr. 14 Integrovaný obvod AD834 v pouzdře DIP.[5]	20
Obr. 15 Funkční blokový diagram integrovaného obvodu AD834.[5].....	20
Obr. 16 Funkční blokový diagram integrovaného obvodu AD835.[6].....	21
Obr. 17 Integrovaný obvod AD835 v pouzdře DIP.[6]	21
Obr. 18 Schéma zapojení obvodu násobení.....	22
Obr. 19 Schéma zapojení kvadrátoru.	23
Obr. 20 Obvod realizující funkci (5.28).	24
Obr. 21 Schéma zapojení děličky s invertujícím zapojením OZ.	25
Obr. 22 Obvod realizující funkci (5.38).	26
Obr. 23 Schéma zapojení odmocniny s invertujícím zapojením OZ.	27
Obr. 24 Obvod realizující funkci (5.49).	28
Obr. 25 Schéma zapojení obvodu dělení s neinvertujícím zapojením OZ.....	29
Obr. 26 Obvod realizující funkci (5.57).	30
Obr. 27 Schéma zapojení odmocniny s neinvertujícím zapojením OZ.	31
Obr. 28 Zapojení obvodu kompenzace.[7]	32
Obr. 29 Zapojení pro nastavení napěťové nesymetrie vstupů U_{I0} . [7]	32
Obr. 30 Kompenzace vstupního klidového proudu.[7].....	33
Obr. 31 Schéma zapojení obvodu násobení, kvadrátoru, odmocniny s invertujícím zapojením OZ a děličky s invertujícím zapojením OZ.	34
Obr. 32 Zapojení IO AD633JN ve funkci násobení v programu OrCAD.	35
Obr. 33 Převodní charakteristika obvodu násobení, při $U_1 = 10\text{ V}$ a $U_2 = \pm 10\text{ V}$	35
Obr. 34 Převodní charakteristika obvodu násobení, při $U_1 = -10\text{ V}$ a $U_2 = \pm 10\text{ V}$	36
Obr. 35 Zapojení IO AD633JN ve funkci kvadrátu v programu OrCAD.....	36
Obr. 36 Převodní charakteristika kvadrátoru, při $U_1 = \pm 10\text{ V}$ a $U_2 = 10\text{ V}$	37
Obr. 37 Zapojení IO AD633JN ve funkci děličky v programu OrCAD.....	37
Obr. 38 Převodní charakteristika děličky s invertujícím zapojením OZ, při $U_4 = -1\text{ V}$, $U_5 = -10\text{ V} \div -1\text{ V}$	38
Obr. 39 Převodní charakteristika děličky s invertujícím zapojením OZ, při $U_4 = -1\text{ V}$, $U_5 = 1\text{ V} \div 10\text{ V}$	38
Obr. 40 Zapojení IO AD633JN ve funkci odmocniny v programu OrCAD.....	39
Obr. 41 Převodní charakteristika odmocniny s invertujícím zapojením OZ, při $U_4 = -10\text{ V} \div 0\text{ V}$	39
Obr. 42 Schéma pro změření výstupního zbytkového napětí U_3 , při $U_1 = U_2 = 0\text{ V}$	40
Obr. 43 Schéma pro určení fázového posunu mezi vstupním a výstupním napětím.	40
Obr. 44 Schéma pro určení odchylky při násobení.....	41
Obr. 45 Závislost chyby výstupního napětí násobičky ve funkci násobení.	42

Obr. 46 Schéma pro simulaci frekvenčních charakteristik.	42
Obr. 47 Nastavení simulace pro amplitudovou a fázovou frekvenční charakteristiku.	43
Obr. 48 Amplitudová frekvenční charakteristika.	43
Obr. 49 Fázová frekvenční charakteristika.	43
Obr. 50 AD633JN v pouzdře DIP.	50
Obr. 51 Blokové schéma obvodu násobení.	51
Obr. 52 Blokové schéma kvadrátoru.	51
Obr. 53 Blokové schéma obvodu dělení.	51
Obr. 54 Blokové schéma odmocniny.	52

3 Seznam tabulek

Tab. 1 Pracovní kvadranty analogových násobiček.[2].....	7
Tab. 2 Základní vlastnosti komerčně dostupných násobiček ve formě IO.[3][4][5][6].....	16
Tab. 3 Vybrané parametry integrovaného obvodu AD633 z katalogu.[3].....	18
Tab. 4 Vybrané parametry integrovaného obvodu AD734 z katalogu.[4].....	19
Tab. 5 Vybrané parametry integrovaného obvodu AD834 z katalogu.[5].....	20
Tab. 6 Vybrané parametry integrovaného obvodu AD835 z katalogu.[6].....	21
Tab. 7 Základní parametry skutečných OZ.[8][9][10]	33
Tab. 8 Změřených fázových posunů při různých frekvencích.	40
Tab. 9 Nasimulované hodnoty vstupních a výstupních napětí a určení odchylky.	41

4 Úvod

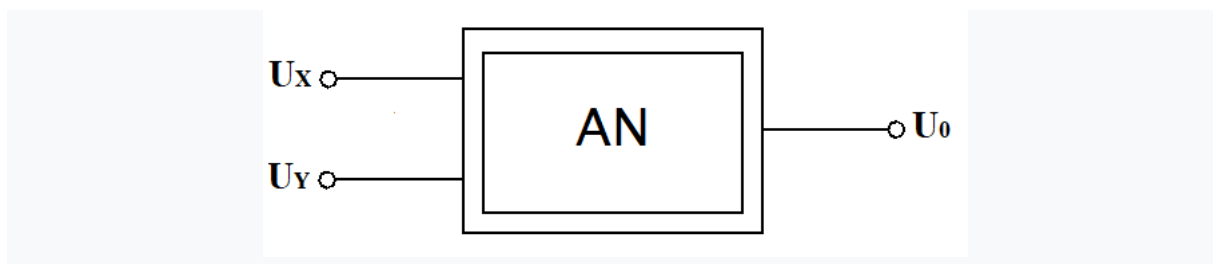
Při práci se signály jsme schopni analogové signály zesilovat, zeslabovat, porovnávat, integrovat, derivovat nebo popřípadě provádět jejich rozdíl, ale nebyli jsme schopni signály analogově násobit, dělit, umocňovat nebo odmocňovat. Tento fakt vedl k vytvoření obvodů, které jsou schopny tyto zmíněné operace uskutečnit, nazýváme je analogové násobičky.

Analogové násobičky jsou obvody, které realizují zmíněné násobení, dělení, umocňování a odmocňování. Můžeme je však použít i pro modulaci, demodulaci, fázovou detekci, pro konstrukci napětím řízených zesilovačů, zeslabovačů a v neposlední řadě přeladitelných filtrů, dokonce dokážeme tyto obvody využít ke konstrukci měřicího přístroje, kterým měříme výkon, a to pouze vhodným zapojením disktrétních součástek.

Stručně popíšu problematiku násobení analogových signálů, specifikuji vlastnosti násobiček dostupných ve formě integrovaných obvodů, provedu návrh aplikačních zapojení – obvod násobení, kvadrátor, obvod dělení s invertujícím a neinvertujícím zapojením OZ, obvod odmocniny s invertujícím a neinvertujícím zapojením OZ. Nakonec vyberu některá navržená zapojení, která budu realizovat ve formě laboratorní úlohy a laboratorním měřením ověřím jejich funkčnost.

5 TEORETICKÝ ROZBOR ANALOGOVÝCH NÁSOBIČEK

Analogové násobičky jsou zařízení, která mají dva vstupní a jeden výstupní port. Výstupní signál je výsledkem dvou vstupních signálů. Jestliže jsou oba vstupy a výstup napěťové tak přenosová funkce je součinem napětí U_x , U_y a měřítka K_n , který má rozměr napětí (Obr. 1).



Obr. 1 Blok analogové násobičky.[2]

Pro takto uvedené blokové schéma platí základní rovnice:

$$U_0 = K_n U_x U_y \quad (5.1)$$

Kde

- K_n je měřítko odpovídá hodnotě menší, než je 1
- U_x U_y jsou vstupní napětí
- U_0 je výstupní napětí

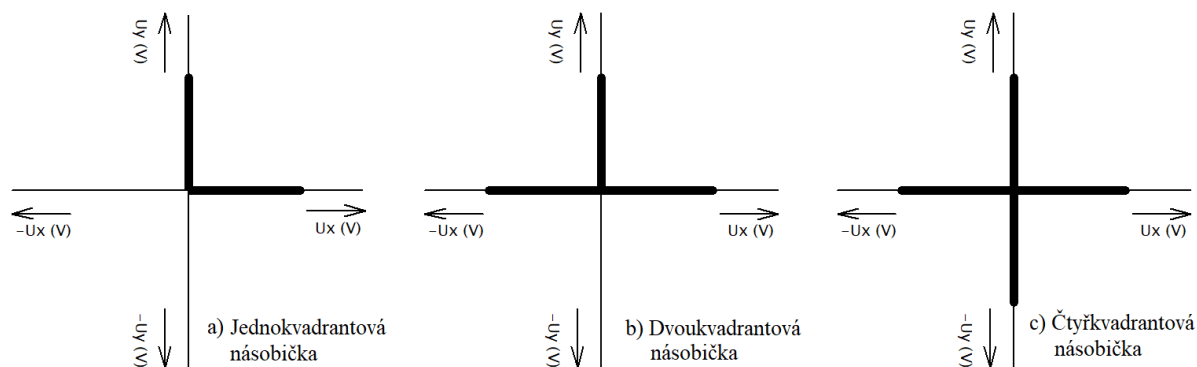
5.1 Rozdělení násobiček – podle pracovního kvadrantu

Analogové násobičky jsem rozdělil podle toho, v jakém pracovním kvadrantu mohou pracovat:

- a) Jednokvadrantové
- b) Dvoukvadrantové
- c) Čtyřkvadrantové

Tab. 1 Pracovní kvadranty analogových násobiček.[2]

Typ	U_x	U_y	U_w
Jednokvadrantové	jednopolový	jednopolový	jednopolový
Dvoukvadrantové	dvoupolový	jednopolový	dvoupolový
Čtyřkvadrantové	dvoupolový	dvoupolový	dvoupolový



Obr. 2 Pracovní kvadranty analogových násobiček.

5.2 Rozdělení násobiček – podle způsobu analogového násobení

Základní požadavky na analogové násobičky:

Dobrá statická přesnost maximálně 1 % z údaje, malý teplotní drift, odolnost proti vnějším rušivým vlivům, rozsah vstupních a výstupních napětích ± 10 V, proudová zatížitelnost výstupu $0 \div 10$ mA, snadná reprodukovatelnost vzhledem k většímu počtu násobiček, minimální počet nastavovacích prvků, vysoká dynamická přesnost v kmitočtovém rozsahu $0 \div 5$ kHz.

Těmto požadavkům vyhovují tři varianty analogového násobení:

- a) Analogová násobička s šířkově-pulsní modulací
- b) Logaritmická analogová násobička
- c) Analogová násobička s rozdělením proudů

Zbylé typy analogových násobiček nevyhovují těmto dynamickým nebo realizačním požadavkům (Hallovy násobičky, servonásobičky nebo obrazkovkové násobičky).[2]

5.2.1 Analogová násobička s logaritmickými zesilovači

Logaritmické násobičky jsou založeny na principu logaritmických a exponenciálních zesilovačů. Logaritmický zesilovač je tvořen operačním zesilovačem, mající ve zpětné vazbě zapojen křemíkový, planárně-epitaxní tranzistor NPN. U tohoto tranzistoru je exponenciální závislost mezi kolektorovým proudem I_C a napětím báze emitor U_{BE} . [2]

Pokud je tranzistor využit v diodovém zapojení, tj. kolektor a báze jsou spojeny na stejném potenciálu pak platí:

$$I_C = I_s \cdot \exp\left(\frac{U_{BE}}{\eta U_T}\right) \quad (5.2)$$

kde:

- I_s je nasycený závěrný proud přechodu báze a emitor tranzistoru v diodovém zapojení.

Tranzistor je tedy v logaritmickém zesilovači zapojen ve zpětné vazbě, pro jeho zapojení je třeba dodržet tyto podmínky – kolektor tranzistoru připojen do nulového bodu operačního zesilovače, emitor tranzistoru připojen na výstup a bázi tranzistoru připojit na zemnicí svorku. Pro takto zapojený operační zesilovač pak platí:

$$u_0 = k \cdot \ln u_x \quad (5.3)$$

kde:

- k je konstanta závislá na parametrech tranzistoru z rovnice (5.2).

Kdyby byl NPN tranzistor zapojen tak, že na emitor se připojí napětí u_1 , kolektor bude připojen k nulovému bodu a báze se uzemní, tak rovnice zesílení bude vypadat takto:

$$u_0 = c \cdot \exp(u_x) \quad (5.4)$$

Rovnice (5.3) a (5.4) byly použity při realizaci logaritmické analogové násobičky, součinem napětí u_1 a u_2 . Rovnici jsem upravil do tohoto tvaru:

$$u_x \cdot u_y = \exp(\ln u_x + \ln u_y) \quad (5.5)$$

Dle rovnice (5.5) součin realizuji jako exponenciální funkci součtu logaritmů. Logaritmy vstupních napětí jsou realizovány v logaritmických zesilovačích následně sečteny v součtových zesilovačích a odlogaritmovány v exponenciálním zesilovači. Jelikož jsou použity NPN tranzistory, tak vstupní napětí mohou být pouze kladná. Jedná se tedy o jednokvadrantovou násobičku. [2]

Pro výstupní napětí logaritmického funkčního měniče z (Obr. 3) platí:

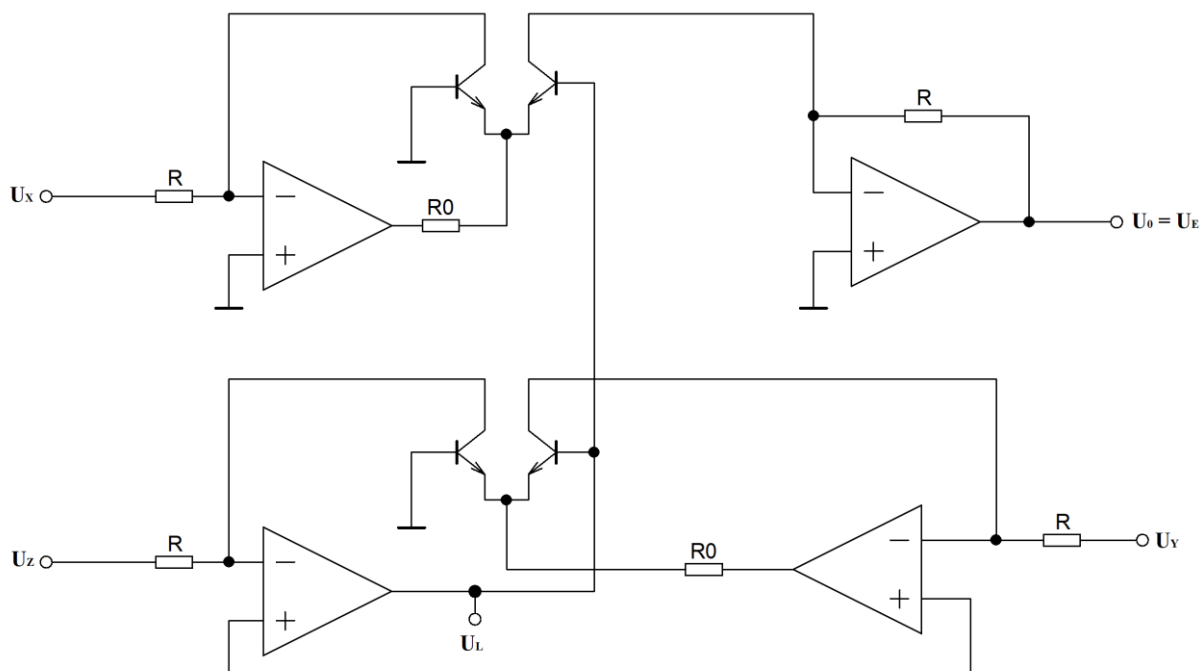
$$U_L = -U_T \cdot \ln \frac{U_Z}{U_Y} \quad (5.6)$$

Pro výstupní napětí logaritmického funkčního měniče z (Obr. 3) platí:

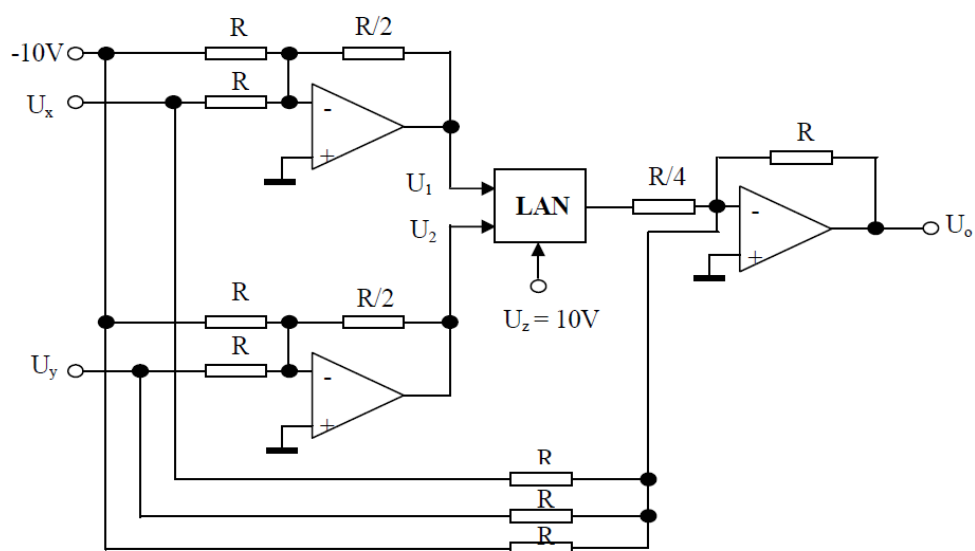
$$U_E = U_x \cdot \exp \frac{U_Z}{U_Y} \quad (5.7)$$

Obvod na (Obr. 3) realizuje přenosovou funkci:

$$U_0 = \frac{U_X \cdot U_Y}{U_Z} \quad (5.8)$$



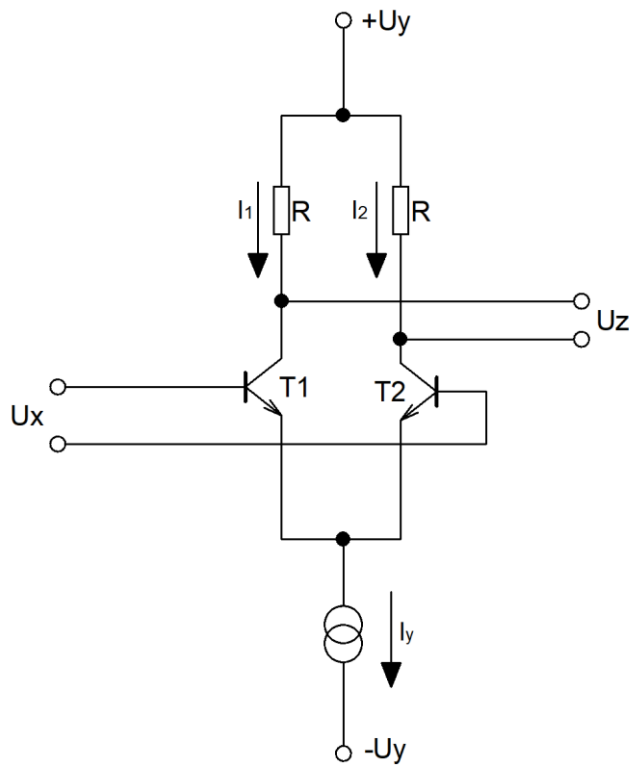
Obr. 3 Jednokvadrantová tepelně kompenzovaná logaritmická analogová násobička.[11]



Obr. 4 Čtyřkvadrantová tepelně kompenzovaná logaritmická analogová násobička.[11]

5.2.2 Analogová násobička s rozdělením proudů

Tento typ využívá metody rozdělení proudů v symetrickém diferenciálním zesilovači složeného ze dvou tranzistorů T1 a T2, které jsou napájené z proudového zdroje.[2]



Obr. 5 Princip metody rozdělení proudů.[2]

Pro rozdělení proudů v obvodech platí:

$$I_1 + I_2 = I_y \quad (5.9)$$

Kde:

$$I_1 \approx (1 + k \cdot U_x) \cdot \frac{I_y}{2} \quad (5.10)$$

$$I_2 \approx (1 - k \cdot U_x) \cdot \frac{I_y}{2} \quad (5.11)$$

Dosazením rovnic (5.10) a (5.11) bude následně platit:

$$U_z = -R \cdot (I_1 - I_2) \approx -kR \cdot U_x \cdot I_y \quad (5.12)$$

Nevýhodou tohoto typu je násobení pouze v omezené šířce pásma, operace s jedním kvadrantem, vstup Y je offsetem U_{BE} , jehož změna je vůči napětí U_Y nelineární, vstup X je ovlivněn nelineární exponenciální závislostí mezi kolektorovým proudem I_C a napětím báze emitor U_{BE} , navíc je zapojení teplotně závislé (Obr. 5). Tento obvod může být linearizován a teplotně stabilní tím, že bude pracovat s proudy místo s napětími a rozšířením o diody s logaritmickou závislostí kolektorového proudu I_C na napětí báze emitor U_{BE} (Obr. 6). Tento typ násobení nazýváme „Gilbertova buňka“. Tato metoda využívá přibližně lineární vztah mezi kolektorovým proudem tranzistoru a jeho transkonduktancí (z).[2]

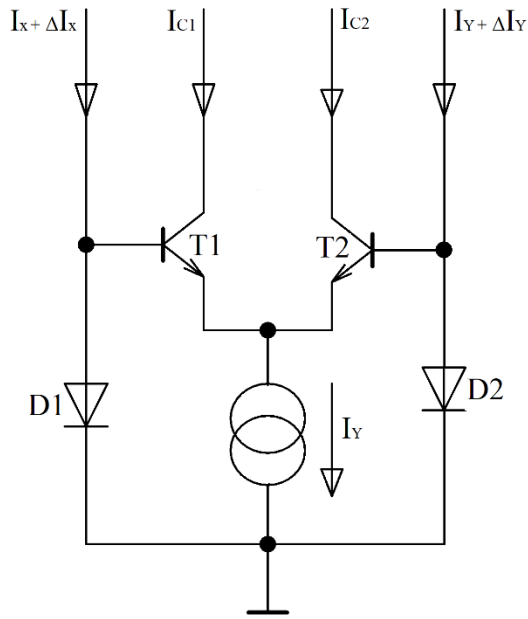
$$\frac{dI_C}{dU_{BE}} = \frac{qI_C}{kT} \quad (5.13)$$

Kde:

- I_C je kolektorový proud,
- U_{BE} představuje napětí mezi bází a emitorem,
- $q = 1.60219 \cdot 10^{-19}$ C což je hodnota náboje elektronu,
- $k = 1.38062 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K}$ tzv. Boltzmanova konstanta,
- T je absolutní teplota.

Použitím tohoto zapojení dojde k rozšíření vstupu X z unipolárního na rozdílový, také výstupní kolektorový proud I_C je rozdílový a pouze proud I_Y stále reprezentuje pouze unipolární vstup a to vytvoří z Gilbertova zapojení dvoukvadrantovou násobičku. Rozdíl proudů na vstupu teče dvěma diodami připojenými na tranzistory a logaritmické napětí kompenzuje exponenciální závislost $\frac{U_{BE}}{I_C}$, také se odstraní míra faktoru $\frac{q}{kT}$. Převodní funkce Gilbertovy buňky je.[2]

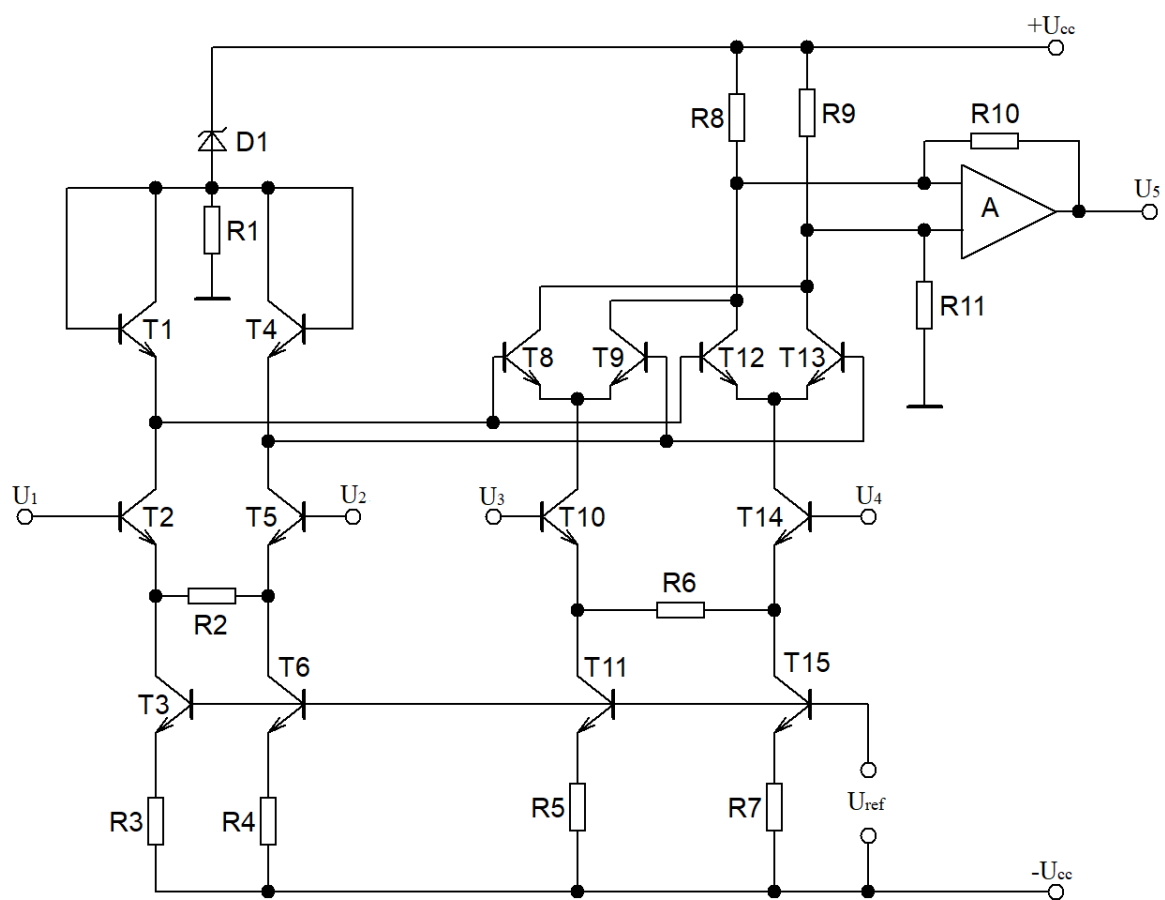
$$\Delta I_C = I_{C1} - I_{C2} = \frac{\Delta I_x I_y}{I_x} \quad (5.14)$$



Obr. 6 Gilbertova buňka.[2]

Abych vytvořil čtyřkvadrantovou násobičku s rozdělením proudů musel jsem křížově spojit dvě Gilbertovy buňky, přidat linearizující tranzistory pro obě buňky a použít převodník I/U. Takové zapojení je na (Obr. 7), kde dvojice tranzistorů T8 T9 a T12 T13 tvoří dvě Gilbertovy buňky, tranzistory T1 a T4 slouží k linearizaci nelineárního přechodu stejně jako diody u dvoukvadrantového zapojení (Obr. 6) a na výstup je připojen rozdílový zesilovač v zapojení převodníku proudu na napětí. Pro aplikace s vyšší rychlostí je zesilovač vynechán a výstup tvoří přímo otevřené kolektory tranzistorů obou Gilbertových buněk, výstup tedy pracuje v proudovém režimu. Převodní funkce u tohoto zapojení je:

$$\Delta I_C = I_{C1} - I_{C2} = \frac{2 \cdot U_x \cdot U_y}{I \cdot R_x \cdot R_y} \quad (5.15)$$



Obr. 7 Čtyřkvadrantová násobička s rozdělením proudů.[2]

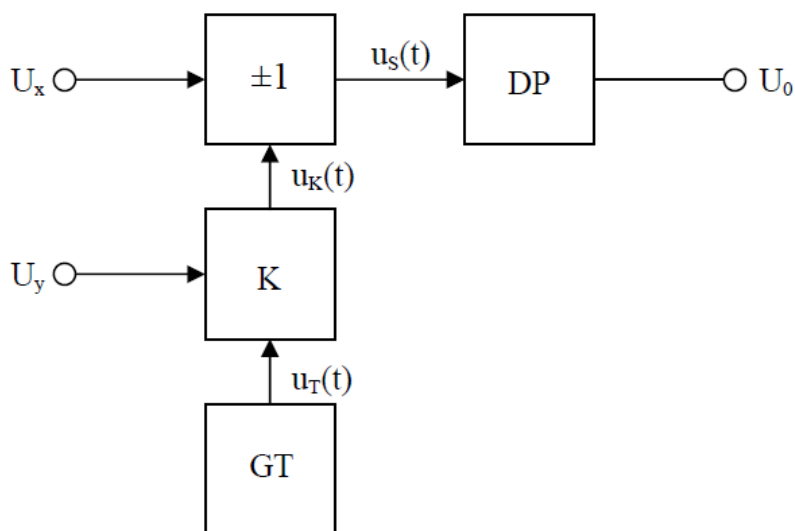
5.2.3 Analogová násobička s šířkově-pulsní modulací

Princip funkce násobičky s šířkově-impulsní modulací je zřejmý z Blokového schématu na (Obr. 7). V komparátoru jsou porovnávány napětí u_T a U_y . Výstupní napětí z komparátoru vstupuje do zesilovače s přepínatelným zesílením, také do tohoto zesilovače vstupuje napětí U_x . Ve výstupním filtru typu dolní propust dochází k vytvoření střední hodnoty napětí U_0 .

$$U_{0AV} = \overline{U_S} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u_S(t) dt = \frac{1}{T} U_x (T_1 - T_2) \quad (5.16)$$

Pro výslednou přenosovou funkci platí:

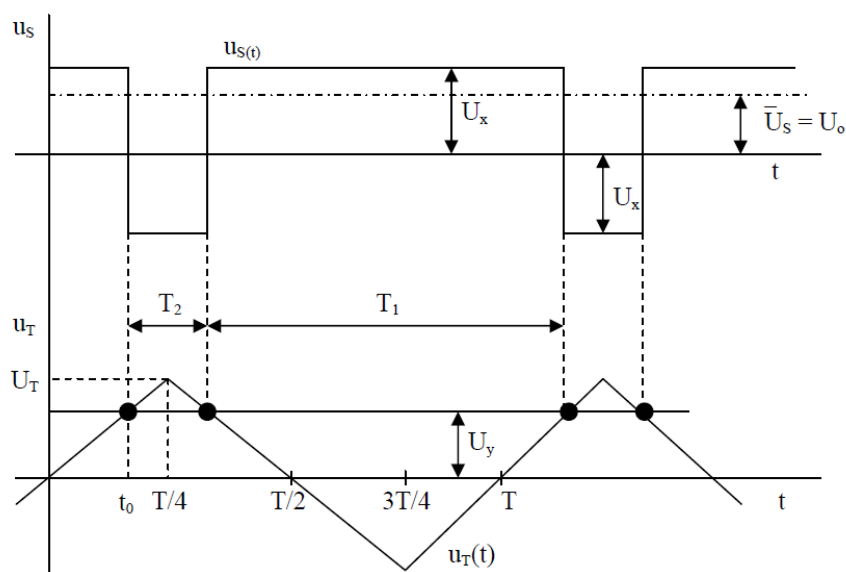
$$U_0 = \overline{U_S} = \frac{U_x U_y}{U_T} \quad (5.17)$$



Obr. 8 Blokové schéma šířkově-impulsní násobičky.[11]

Kde:

- GT generátor trojúhelníkového napětí konstantní frekvence.
- K je komparátor srovnávající hodnoty u_T a U_y .
- S je střídač $\pm u_2$, řízený signálem komparátoru.
- DP je filtr typu dolní propust, vytvářející střední hodnotu u_0 .



Obr. 9 Časové průběhy u_T , u_S . [11]

5.3 Vlastnosti komerčně dostupných násobiček ve formě IO

Analog Devices je firma zabývající se výrobou analogových násobiček, tato firma byla založena v roce 1965 a specializuje se na technologie zpracovávání analogových a digitálních signálů. Mezi její produkty patří A/D a D/A převodníky, zesilovače, vysokofrekvenční IO (RFIS), procesory a DSP. Pro detailnější popis byly vybrány tyto analogové násobičky AD633, AD734, AD834, AD835.

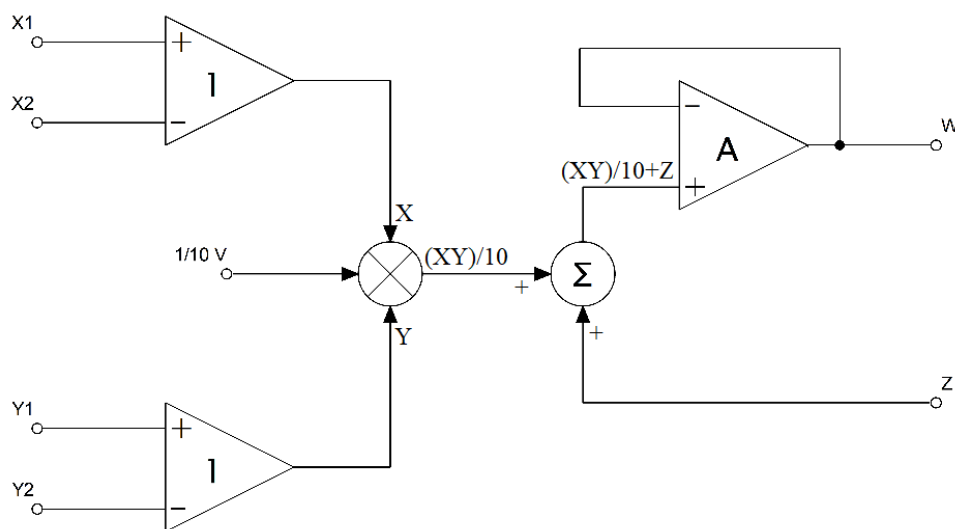
Tab. 2 Základní vlastnosti komerčně dostupných násobiček ve formě IO. [3][4][5][6]

IO	Přenosová funkce	Šířka pásma [MHz]	Napájecí napětí [V]
AD633	$W = \frac{(X_1 - X_2) \cdot (Y_1 - Y_2)}{10 V} + Z$	1	$\pm 8 \div \pm 18$
AD734	$W = A_0 \left[\frac{(X_1 - X_2) \cdot (Y_1 - Y_2)}{U_1 - U_2} - (Z_1 - Z_2) \right]$	$8 \div 10$	$\pm 8 \div \pm 16,5$
AD834	$W = \frac{X \cdot Y}{(1 V)^2} \cdot 4 mA$	500	$\pm 4 \div \pm 9$
AD835	$W = \frac{(X_1 - X_2) \cdot (Y_1 - Y_2)}{U} + Z$	250	$\pm 4,5 \div \pm 5,5$

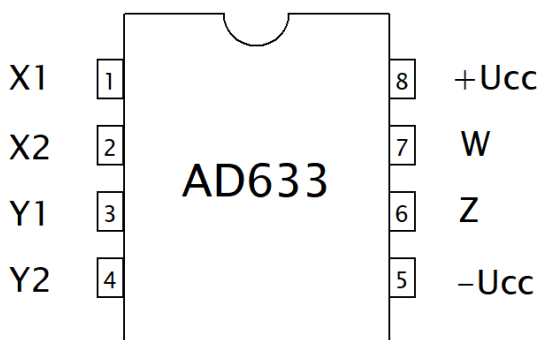
5.3.1 Vlastnosti obvodu AD633

AD633 je čtyř kvadrantová napěťová násobička. Má vysoko impedanční rozdílové vstupy X, Y a Z. Také je tento IO laserově kalibrován. Vstup Z poskytuje přístup k výstupnímu zesilovači vyrovnávací paměti, umožňující uživateli sčítat vstupy dvou nebo více násobitelů, zvyšuje součinný zisk, převádí výstupní napětí na proud a konfiguruje různé aplikace. AD633 je k dostání v pouzdře DIP (N) nebo SOIC (R). Pro tento IO obvod je stanovena celková přenosová funkce (5.18). Převod spočívá v průchodu signálu rozdílovými zesilovači se zesílením 1, následně vynásobením výstupu z rozdílových zesilovačů a konstanty $\frac{1}{10}$, sečtením se vstupem Z a průchodem operačním sledovačem se zesílením $A \rightarrow \infty$. Na (Obr. 10) je funkční blokový diagram tohoto IO, které slouží pro pochopení funkce, ve skutečnosti však jsou vnitřní signály ve formě proudů a tato násobička tedy využívá principu rozdělení proudů.[3]

$$W = \frac{(X_1 - X_2) \cdot (Y_1 - Y_2)}{10 V} + Z \quad (5.18)$$



Obr. 10 Funkční blokový diagram integrovaného obvodu AD633.[3]



Obr. 11 Integrovaný obvod AD633 v pouzdře DIP.[3]

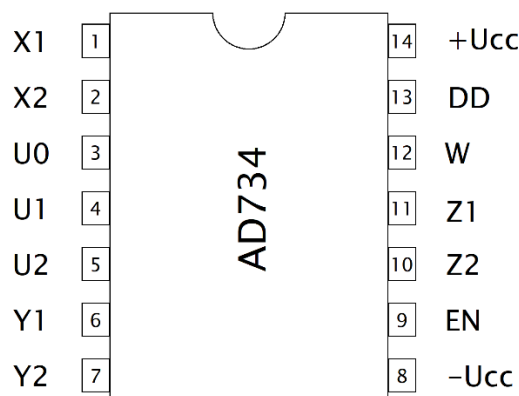
Tab. 3 Vybrané parametry integrovaného obvodu AD633 z katalogu.[3]

Parametry	Technická data
Vnitřní energetické ztráty	500 mW
Akumulovaný teplotní rozsah	-65 °C ÷ 150 °C
Provozní teplotní rozsah	0 °C ÷ 70 °C (stupeň J)
Provozní teplotní rozsah	-40 °C ÷ 85 °C (stupeň A)
Celková přesnost	2 %
Šum vztažený k výstupu	> 100 μV
Nelinearita vstupu Y	± 0,1 %
Nelinearita vstupu X	± 0,4 %
Offset výstupního napětí	± 5 mV
Offset vstupních napětí (X,Y)	± 5 mV

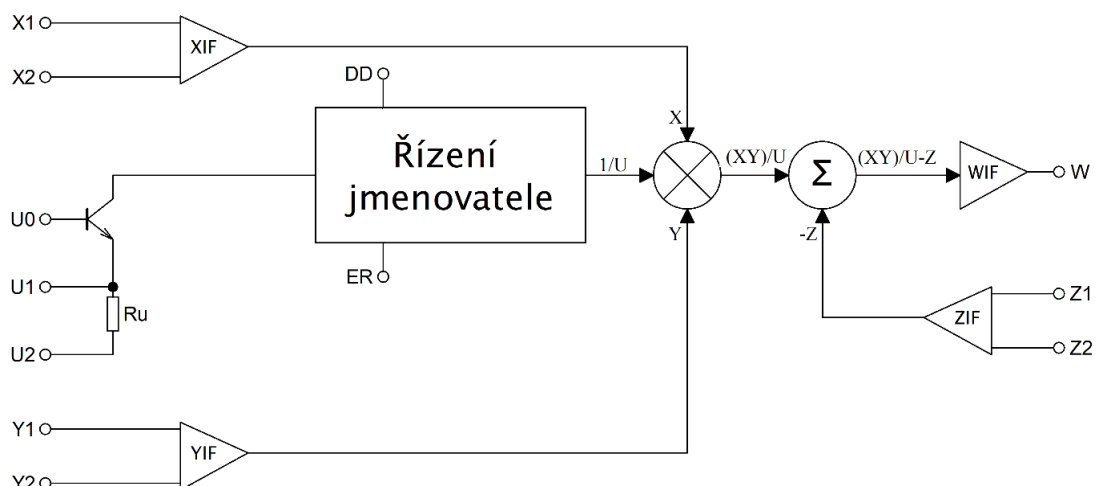
5.3.2 Vlastnosti obvodu AD734

AD734 je čtyřkvadrantová vysokorychlostní napěťová analogová násobička, je kompatibilní s IO AD534. Nízko kapacitní vstupy X, Y a Z jsou zcela rozdílové. Tento IO má možnost přístupu k napětí externího jmenovatele, to uživateli umožňuje měnit velikost dělicího poměru U (Obr. 13). AD734 je k dostání v 14 – vývodovém plastovém pouzdře DIP (N) nebo 14 – vývodovém keramickém pouzdře CERDIP (Q). Převod spočívá v průchodu signálu rozdílovými zesilovači se zesílením 1, následně vynásobením výstupu z rozdílových zesilovačů a konstanty $\frac{1}{U}$, odečtením od rozdílového vstupu Z. Na (Obr. 13) je funkční blokový diagram tohoto IO, který slouží pro pochopení funkce, ve skutečnosti však jsou vnitřní signály ve formě proudů a tato násobička tedy využívá principu rozdělení proudů. Pro tento IO obvod je stanovena celková přenosová funkce (5.19).[4]

$$W = A_0 \cdot \left[\frac{(X_1 - X_2) \cdot (Y_1 - Y_2)}{U_1 - U_2} - (Z_1 - Z_2) \right] \quad (5.19)$$



Obr. 12 Integrovaný obvod AD734 v pouzdře DIP.[4]



Obr. 13 Funkční blokový diagram integrovaného obvodu AD734.[4]

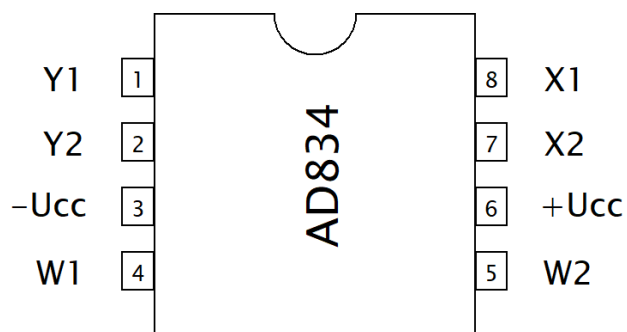
Tab. 4 Vybrané parametry integrovaného obvodu AD734 z katalogu.[4]

Parametry	Technická data
Vnitřní energetické ztráty	500 mW
Akumulovaný teplotní rozsah	-65 °C ÷ 150 °C
Teplotní rozsah pro vojenský průmysl	55 °C ÷ 125 °C (stupeň S,883B)
Teplotní rozsah pro průmysl	-40 °C ÷ 85 °C (stupeň A, B)
Rychlost přeběhu	450 V/μs
Maximální offset vstupu X	15
Maximální offset vstupu Y	10
Maximální offset vstupu Z	20
Celková statická chyba	0,1 %

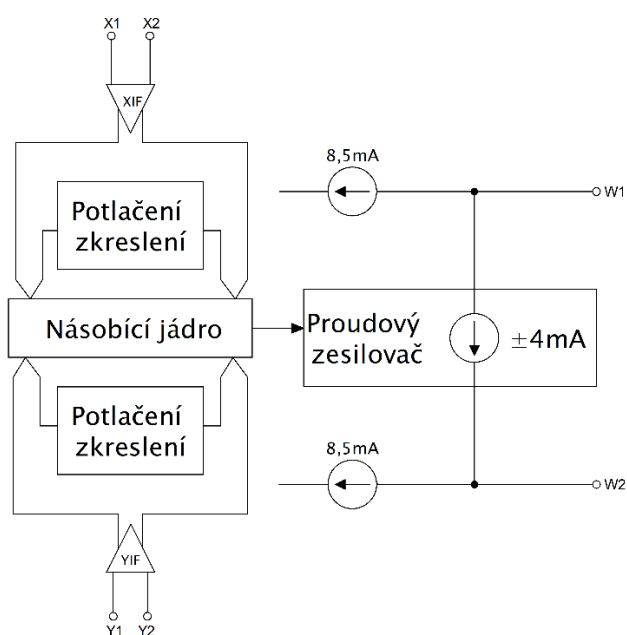
5.3.3 Vlastnosti obvodu AD834

AD834 je čtyřkvadrantová násobička určená především pro vysokofrekvenční aplikace. AD834 je k dispozici v 8 – vývodovém pouzdře PDIP (N), SOIC (R) a CERDIP (Q). Na vstupy X a Y je přivedeno napětí, které je převedeno na proud pomocí převodníku U/I (XIF a YIF) výstup je proudový (W1 a W2), protože obvod neobsahuje na výstupu převodník I/U. Vnitřní signály jsou ve formě proudů, AD834 pracuje na principu rozdělení proudů bez výstupního převodníku I/U. Když budou vstupy X a Y nabývat kladných hodnot napětí tak každý z výstupů W1 a W2 bude mít stálý proud 8,5mA. AD834 se využívá v mnoha vysokorychlostních nelineárních aplikacích (druhá odmocnina, dělení, přidání vektoru a RMS/DC převodník). Pro tento IO obvod je stanovena celková přenosová funkce (5.20).[5]

$$W = \frac{X \cdot Y}{(1 \text{ V})^2} \cdot 4 \text{ mA} \quad (5.20)$$



Obr. 14 Integrovaný obvod AD834 v pouzdře DIP.[5]



Obr. 15 Funkční blokový diagram integrovaného obvodu AD834.[5]

Tab. 5 Vybrané parametry integrovaného obvodu AD834 z katalogu.[5]

Parametry	Technická data
Vnitřní energetické ztráty	500 mW
Akumulovaný teplotní rozsah	-65 °C ÷ 150 °C (Q)
Akumulovaný teplotní rozsah	-65 °C ÷ 125 °C (R, N)
Komerční teplotní rozsah	0 °C ÷ 70 °C (stupeň J)
Teplotní rozsah pro vojenský průmysl	55 °C ÷ 125 °C (stupeň S, 883B)
Teplotní rozsah pro průmysl	-40 °C ÷ 85 °C (stupeň A)
Nelinearita vstupu X	0,2 %
Nelinearita vstupu Y	0,1 %
Celková chyba v plném rozsahu	0,5 %

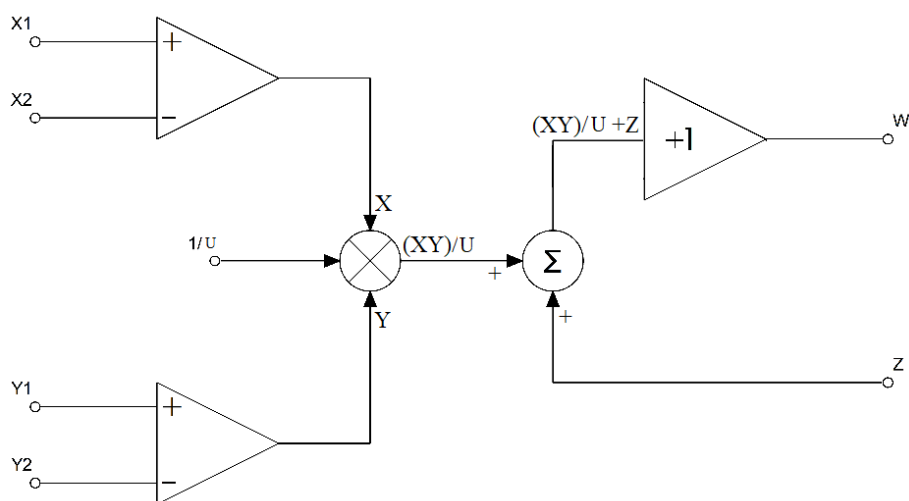
5.3.4 Vlastnosti obvodu AD835

AD834 je čtyřkvadrantová napěťová analogová násobička. Má vysoko impedanční vstupy X, Y a Z (X a Y jsou rozdílové vstupy a Z je sumační vstup). Jmenovatel U nabývá jmenovité hodnoty

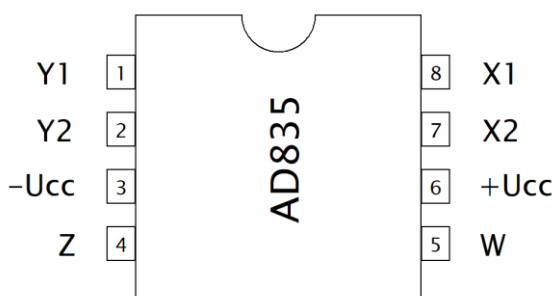
$U = 1,05 \text{ V}$ tuto hodnotu lze upravit pomocí děliče zapojeného mezi piny W a Z.

AD834 je k dispozici v 8 – vývodovém pouzdře mini-DIP (N) a SOIC (R). AD835 má nižší šum než AD534 a AD734, to je vhodné pro aplikace se zpracováním nízko úrovnových signálů (modulátor, prvek pro širokopásmové řízení zisku). Převod spočívá v průchodu signálu rozdílovými zesilovači se zesílením 1, následně vynásobením výstupu z rozdílových zesilovačů a konstanty $\frac{1}{U}$, sečtením se vstupem Z. AD835 pracuje na principu rozdělení proudů. Pro tento IO obvod je stanovena celková přenosová funkce (5.21). [6]

$$W = \frac{(X_1 - X_2) \cdot (Y_1 - Y_2)}{U} + Z \quad (5.21)$$



Obr. 16 Funkční blokový diagram integrovaného obvodu AD835. [6]



Obr. 17 Integrovaný obvod AD835 v pouzdře DIP. [6]

Tab. 6 Vybrané parametry integrovaného obvodu AD835 z katalogu. [6]

Parametry	Technická data
Vnitřní energetické ztráty	300 mW
Akumulovaný teplotní rozsah	-65 °C ÷ 150 °C
Teplotní rozsah pro průmysl	-40 °C ÷ 85 °C (stupeň A)
Rychlost přeběhu	1000 V/μs

5.4 Aplikace analogových násobiček

Po domluvě s vedoucím bakalářské práce jsem vybral IO AD633JN a s tímto IO jsem provedl návrh základních aplikačních zapojení. Vybral jsem tyto aplikace – obvod násobení, kvadrátor, odmocninu s invertujícím a neinvertujícím zapojením OZ a obvod dělení s invertujícím a neinvertujícím zapojením OZ.

5.4.1 Aplikace IO AD633 – Násobení.

IO AD633 realizuje přenosovou funkci (5.22):

$$W = \frac{(X_1 - X_2) \cdot (Y_1 - Y_2)}{10\text{ V}} + Z. \quad (5.22)$$

Přenosovou funkci (5.22) budu dále upravovat, v čitateli je součin rozdílů vstupů $(X_1 - X_2) \cdot (Y_1 - Y_2)$ toto je výhodné, protože stačí vstupy X_2, Y_2 připojit na svorku GND výsledný vztah bude poté vypadat následovně:

$$W = \frac{X_1 \cdot Y_1}{10\text{ V}} + Z \quad (5.23)$$

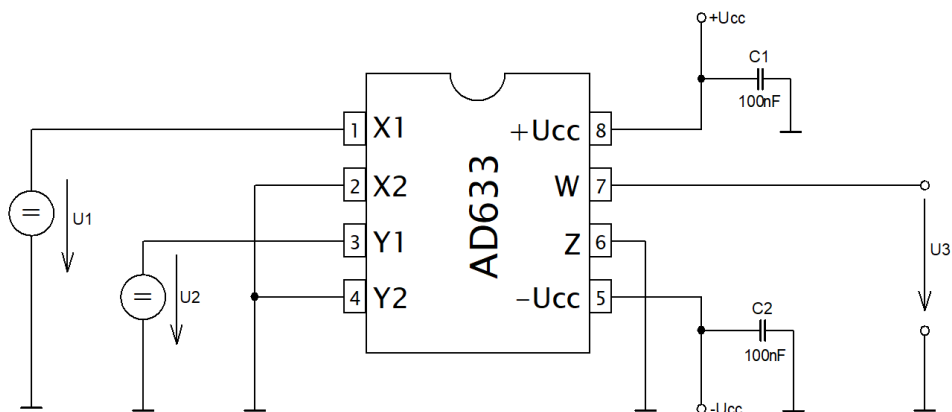
Ve výsledné přenosové funkci překáží sumační vstup Z , proto jsem tento vstup také připojil na svorku GND. Výsledná rovnice pak bude mít takovýto tvar:

$$W = \frac{X_1 \cdot Y_1}{10\text{ V}} \quad (5.24)$$

Rovnici (5.24) jsem použil k realizace obvodu násobení, na vstupy X_1 a Y_1 se budou připojovat zdroje napětí U_1 a U_2 , výsledné výstupní napětí jsem označil jako U_3 . Rovnice pak bude vypadat následovně:

$$U_3 = \frac{U_1 \cdot U_2}{10\text{ V}} \quad (5.25)$$

Zapojení obvodu násobení je na (Obr. 18).



Obr. 18 Schéma zapojení obvodu násobení.

5.4.2 Aplikace IO AD633 – Kvadrátor.

Podobným způsobem jsem navrhnul obvod realizující druhou mocninu. IO AD633 realizuje přenosovou funkci:

$$W = \frac{(X_1 - X_2) \cdot (Y_1 - Y_2)}{10 V} + Z. \quad (5.26)$$

Přenosová funkce (5.26) byla upravena jako v předešlém případě, v čitateli je součin rozdílů vstupů $(X_1 - X_2) \cdot (Y_1 - Y_2)$ proto vstupy X2 a Y2 připojím na svorku GND výsledný vztah bude poté vypadat následovně:

$$W = \frac{X_1 \cdot Y_1}{10 V} + Z \quad (5.27)$$

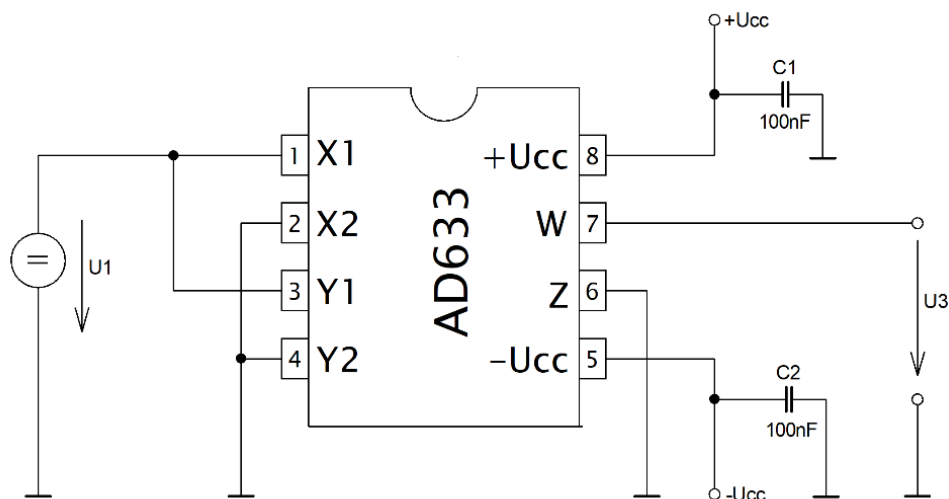
Ve výsledné přenosové funkci překáží sumační vstup Z, proto jsem tento vstup také připojil na svorku GND. Výsledná rovnice pak bude mít takovýto tvar:

$$W = \frac{X_1 \cdot Y_1}{10 V} \quad (5.28)$$

Abych vytvořil kvadrátor, a ne násobení musí se vstupy X1 a Y1 spojit a tím vytvoří kvadrát. V obvodu bude pouze jeden zdroj napětí označený jako U1 a výsledné výstupní napětí je označené jako U3.

$$U_3 = \frac{(U_1)^2}{10 V} \quad (5.29)$$

Zapojení, které realizuje funkci (5.29) je na (Obr. 19).



Obr. 19 Schéma zapojení kvadrátoru.

5.4.3 Aplikace IO AD633 – Dělička s invertujícím zapojením OZ.

Další aplikací je dělička s invertujícím zapojením OZ. IO AD633 realizuje přenosovou funkci:

$$W = \frac{(X_1 - X_2) \cdot (Y_1 - Y_2)}{10\text{ V}} + Z. \quad (5.30)$$

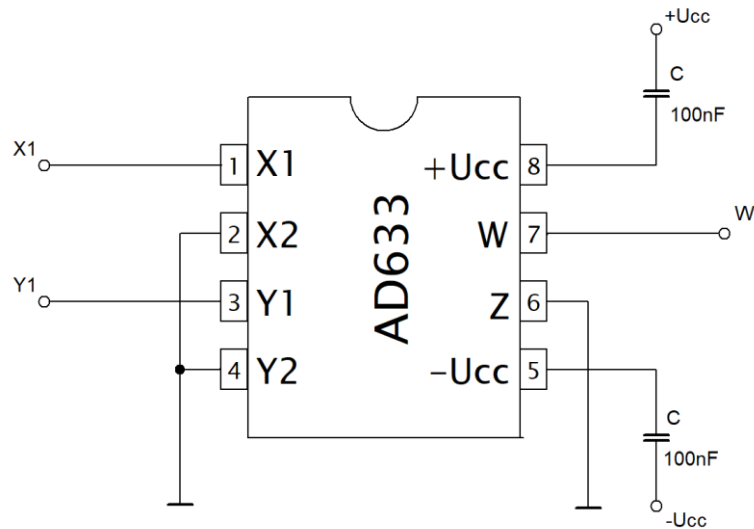
Přenosová funkce (5.30) byla upravena tak, že v čitateli je součin rozdílů vstupů $(X_1 - X_2) \cdot (Y_1 - Y_2)$ vstupy X2 a Y2 byly připojeny na svorku GND a výsledný vztah bude poté vypadat následovně:

$$W = \frac{X_1 \cdot Y_1}{10\text{ V}} + Z \quad (5.31)$$

Ve výsledné přenosové funkci překáží sumační vstup Z, proto byl tento vstup připojen na svorku GND. Výsledná rovnice pak bude mít takovýto tvar:

$$W = \frac{X_1 \cdot Y_1}{10\text{ V}} \quad (5.32)$$

Zapojení, které realizuje přenosovou (5.32) je na (Obr. 20)



Obr. 20 Obvod realizující funkci (5.32).

Abych vytvořil děličku je třeba zapojení z (Obr. 20) připojit do zpětné vazby invertujícího zapojení OZ, poté budou platit pro proudy I_1 a I_2 tyto rovnice:

$$I_2 = \frac{X_1 \cdot Y_1}{10\text{ V} \cdot R_2} \quad (5.33)$$

$$I_1 = \frac{U_4}{R_1} \quad (5.34)$$

Podle prvního Kirchhoffova zákona pak platí:

$$I_1 + I_2 = I_3 \cong 0 \quad (5.35)$$

Po dosazení do rovnice (5.35) jsem dostal:

$$\frac{U_4}{R_1} + \frac{X_1 \cdot Y_1}{10 V \cdot R_2} = 0 \quad (5.36)$$

V rovnici (5.36) byly upraveny exponenty $X_1 = U_5$ a $Y_1 = U_6$:

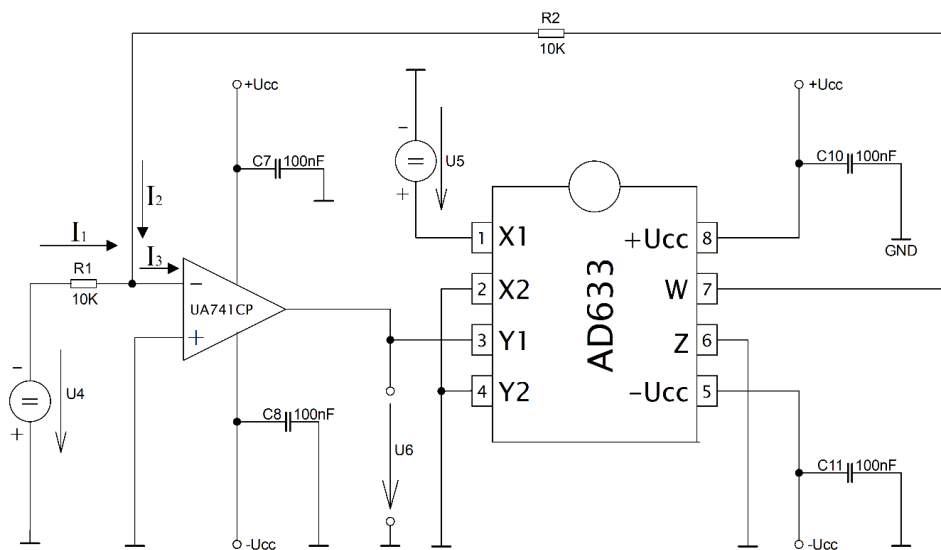
$$\frac{U_4}{R_1} + \frac{U_5 \cdot U_6}{10 V \cdot R_2} = 0 \quad (5.37)$$

Po úpravě rovnice (5.37) jsem dostal:

$$\frac{U_5 \cdot U_6}{10 V \cdot R_2} = -\frac{U_4}{R_1} \quad (5.38)$$

$$U_6 = -10 V \cdot \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{U_4}{U_5} \quad (5.39)$$

Rovnice (5.39) je výslednou přenosovou funkcí pro děličku s invertujícím zapojením OZ, realizace zapojení je na (Obr. 21).



Obr. 21 Schéma zapojení děličky s invertujícím zapojením OZ.

5.4.4 Aplikace IO AD633 – Odmocnina s invertujícím zapojením OZ.

IO AD633 realizuje přenosovou funkci:

$$W = \frac{(X_1 - X_2) \cdot (Y_1 - Y_2)}{10 V} + Z. \quad (5.40)$$

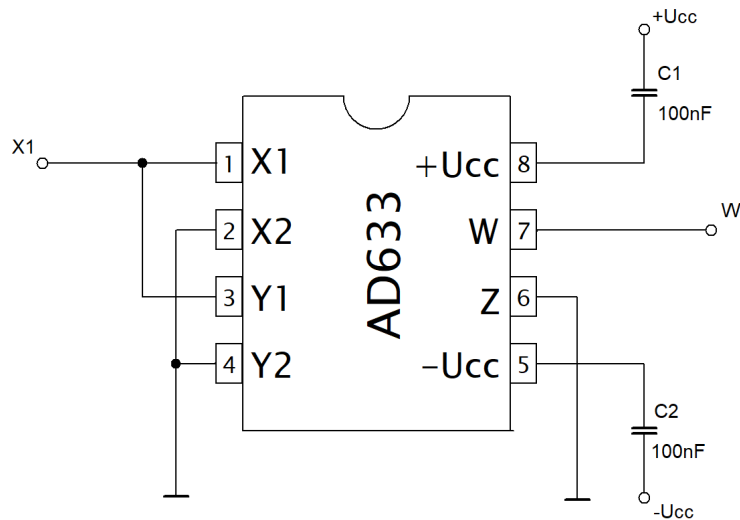
Přenosovou funkci (5.40) budu dále upravovat, v čitateli je součin rozdílů vstupů $(X_1 - X_2) \cdot (Y_1 - Y_2)$ vstupy X2 a Y2 jsem připojil na svorku GND výsledný vztah bude poté vypadat následovně:

$$W = \frac{X_1 \cdot Y_1}{10 V} + Z \quad (5.41)$$

Ve výsledné přenosové funkci překáží sumační vstup Z, proto jsem tento vstup také připojil na svorku GND, také bylo zapotřebí spojit vstupy X_1 a Y_1 k vytvoření druhé mocniny, výsledná rovnice pak bude mít takovýto tvar:

$$W = \frac{(X_1)^2}{10 V} \quad (5.42)$$

Zapojení které realizuje funkci (5.42) je na (Obr. 22).



Obr. 22 Obvod realizující funkci (5.42).

Abych vytvořil odmocninu s invertujícím zapojením OZ bylo zapotřebí zapojení z (Obr. 22) připojit do zpětné vazby invertujícího zapojení OZ, poté bude platit pro proudy I_1 a I_2 tyto rovnice:

$$I_2 = \frac{(X_1)^2}{10 V \cdot R_2} \quad (5.43)$$

$$I_1 = \frac{U_4}{R_1} \quad (5.44)$$

Podle prvního Kirchhoffova zákona pak platí:

$$I_1 + I_2 = I_3 \cong 0 \quad (5.45)$$

Po dosazení do rovnice (5.45) jsem dostal:

$$\frac{U_4}{R_1} + \frac{(X_1)^2}{10 V \cdot R_2} = 0 \quad (5.46)$$

V rovnici (5.46) byly upraveny exponenty $X_1 = U_6$:

$$\frac{U_4}{R_1} + \frac{(U_6)^2}{10 V \cdot R_2} = 0 \quad (5.47)$$

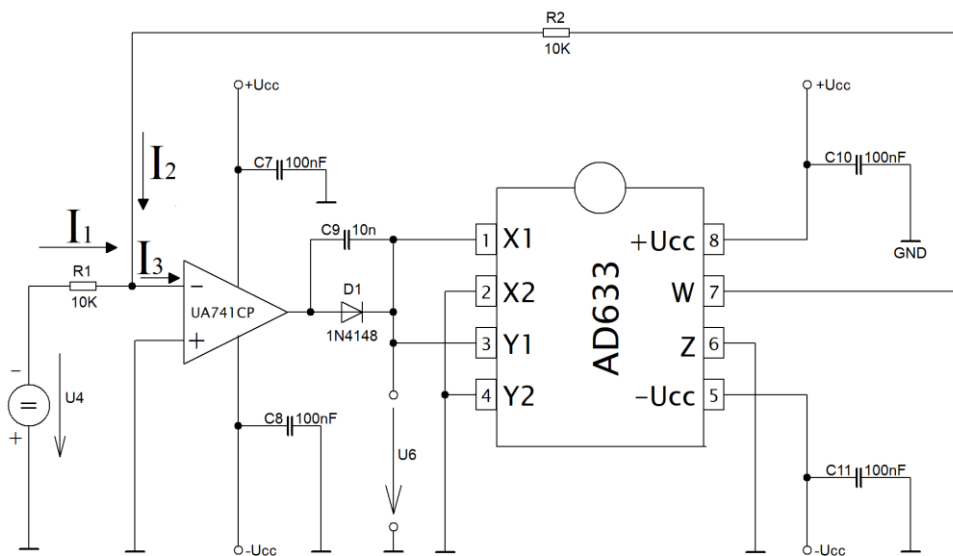
Po úpravě rovnice (5.47) jsem dostal:

$$\frac{(U_6)^2}{10 V \cdot R_2} = -\frac{U_4}{R_1} \quad (5.48)$$

$$(U_6)^2 = -10 V \cdot U_4 \cdot \frac{R_2}{R_1} \quad (5.49)$$

$$U_6 = \sqrt{-10 V \cdot U_4 \cdot \frac{R_2}{R_1}} \quad (5.50)$$

Rovnice (5.50) je výslednou přenosovou funkcí pro odmocninu s invertujícím zapojením OZ, realizace zapojení je na (Obr. 23).



Obr. 23 Schéma zapojení odmocniny s invertujícím zapojením OZ.

5.4.5 Aplikace IO AD633 – Dělička s neinvertujícím zapojením OZ.

Předposlední aplikací je dělička s neinvertujícím zapojením OZ. IO AD633 realizuje přenosovou funkci:

$$W = \frac{(X_1 - X_2) \cdot (Y_1 - Y_2)}{10 V} + Z. \quad (5.51)$$

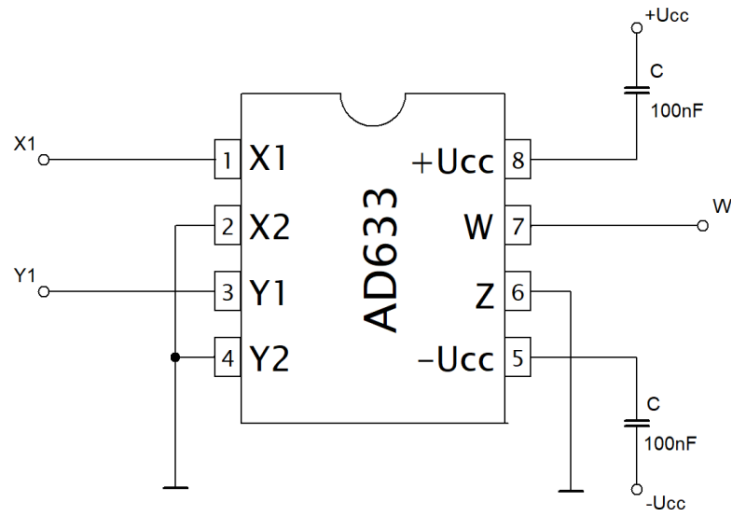
Přenosovou funkci (5.51) budu dále upravovat, v čitateli je součin rozdílů vstupů $(X_1 - X_2) \cdot (Y_1 - Y_2)$ proto jsem vstupy X2 a Y2 připojil na svorku GND výsledný vztah bude poté vypadat následovně:

$$W = \frac{X_1 \cdot Y_1}{10 V} + Z \quad (5.52)$$

Ve výsledné přenosové funkci překáží sumační vstup Z, proto jsem tento vstup také připojil na svorku GND, výsledná rovnice pak bude mít takovýto tvar:

$$W = \frac{X_1 \cdot Y_1}{10 V} \quad (5.53)$$

Zapojení které realizuje funkci (5.53) je na (Obr. 26).



Obr. 24 Obvod realizující funkci (5.53).

Abych vytvořil děličku s neinvertujícím zapojením OZ je třeba pin (W) z (Obr. 24) připojit na invertující vstup OZ, poté platí:

$$U_I = \frac{X_1 \cdot Y_1}{10 V} \quad (5.54)$$

$$U_N = U_4 \quad (5.55)$$

V rovnici (5.54) byly upraveny exponenty $X_1 = U_6$ a $Y_1 = U_5$:

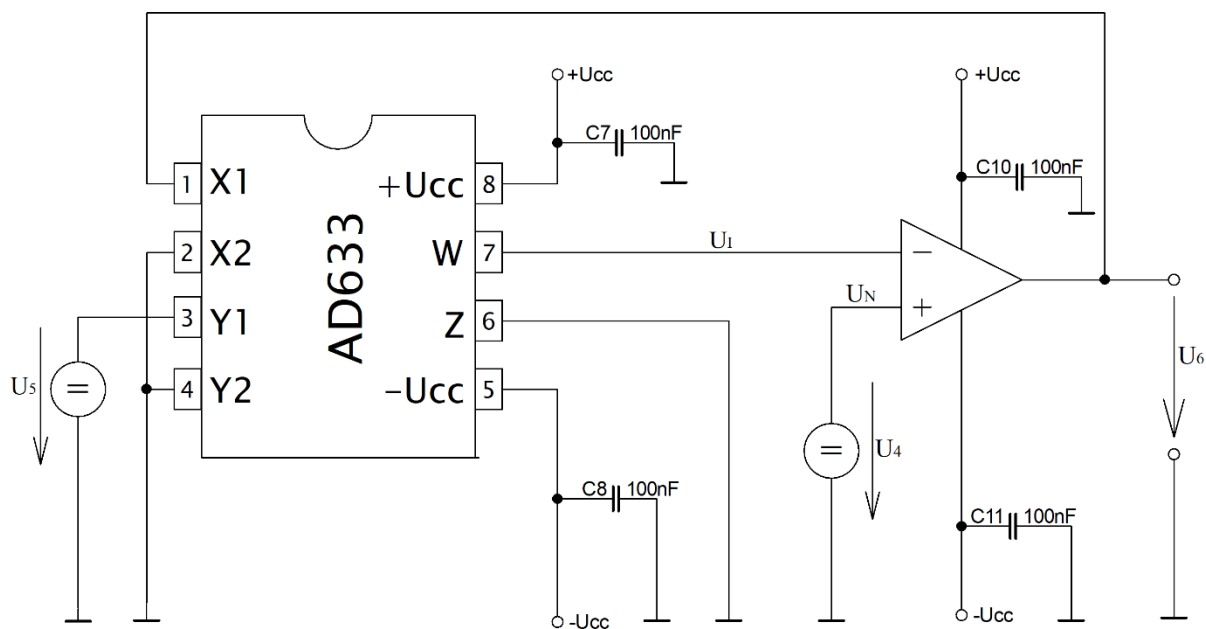
$$U_I = \frac{U_6 \cdot U_5}{10 V} \quad (5.56)$$

Pro $U_I \cong U_N$ platí:

$$\frac{U_5 \cdot U_6}{10 V} = U_4 \quad (5.57)$$

$$U_6 = 10 V \cdot \frac{U_4}{U_5} \quad (5.58)$$

Rovnice (5.58) je výslednou přenosovou funkcí pro děličku s neinvertujícím zapojením OZ, realizace zapojení je na (Obr. 25).



Obr. 25 Schéma zapojení obvodu dělení s neinvertujícím zapojením OZ.

5.4.6 Aplikace IO AD633 – Odmocnina s neinvertujícím OZ.

Poslední aplikací je odmocnina s neinvertujícím zapojením OZ. IO AD633 realizuje přenosovou funkci:

$$W = \frac{(X_1 - X_2) \cdot (Y_1 - Y_2)}{10 V} + Z. \quad (5.59)$$

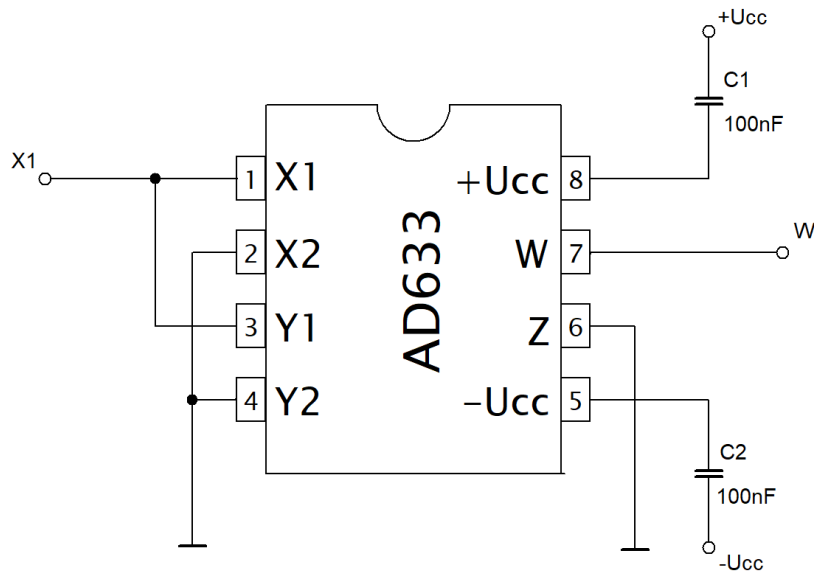
Přenosovou funkci (5.59) budu dále upravovat, v čitateli je součin rozdílů vstupů $(X_1 - X_2) \cdot (Y_1 - Y_2)$ proto jsem vstupy X2 a Y2 připojil na svorku GND výsledný vztah bude poté vypadat následovně:

$$W = \frac{X_1 \cdot Y_1}{10 V} + Z \quad (5.60)$$

Ve výsledné přenosové funkci překáží sumační vstup Z, proto jsem tento vstup také připojil na svorku GND, také bylo zapotřebí spojit vstupy X_1 a Y_1 k vytvoření druhé mocniny, výsledná rovnice pak bude mít takovýto tvar:

$$W = \frac{(X_1)^2}{10 V} \quad (5.61)$$

Zapojení které realizuje funkci (5.61) je na (Obr. 26).



Obr. 26 Obvod realizující funkci (5.61).

Abych vytvořil odmocninu s neinvertujícím zapojením OZ je třeba pin (W) z (Obr. 26) připojit na invertující vstup OZ, poté platí:

$$U_I = \frac{(X_1)^2}{10 V} \quad (5.62)$$

$$U_N = U_4 \quad (5.63)$$

V rovnici (5.54) byly upraveny exponenty $X_1 = U_6$:

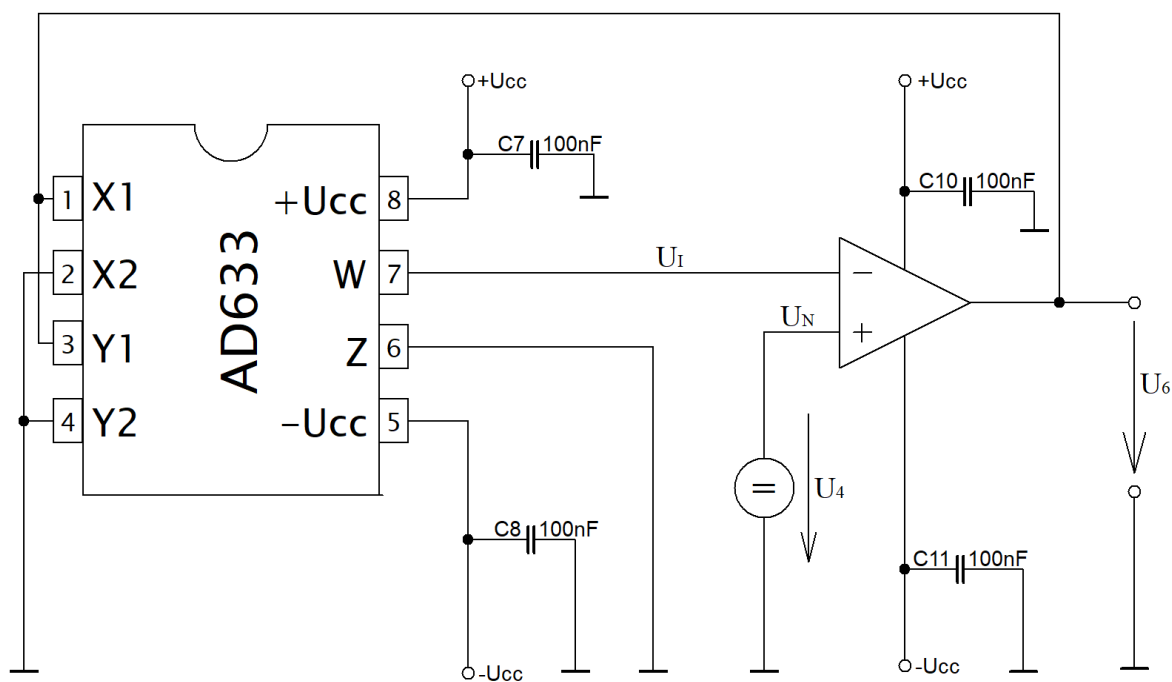
$$U_I = \frac{(U_6)^2}{10 V} \quad (5.64)$$

Pro $U_I \cong U_N$ platí:

$$\frac{(U_6)^2}{10 V} = U_4 \quad (5.65)$$

$$U_6 = \sqrt{10 V \cdot U_4} \quad (5.66)$$

Rovnice (5.66) je výslednou přenosovou funkcí odmocniny s neinvertujícím zapojením OZ. Realizace zapojení je na (Obr. 27).



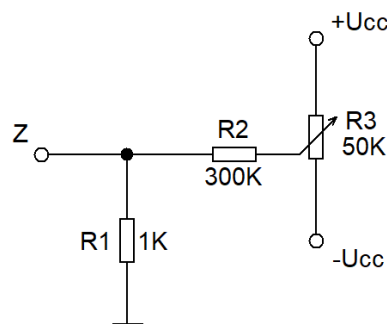
Obr. 27 Schéma zapojení odmocniny s neinvertujícím zapojením OZ.

5.5 Zvýšení přesnosti navržených zapojení

V této kapitole se zaměřím především na chyby, které jsou způsobeny IO AD633JN a OZ, návrhem na jejich redukci a případné odstranění.

5.5.1 Zvýšení přesnosti IO AD633JN.

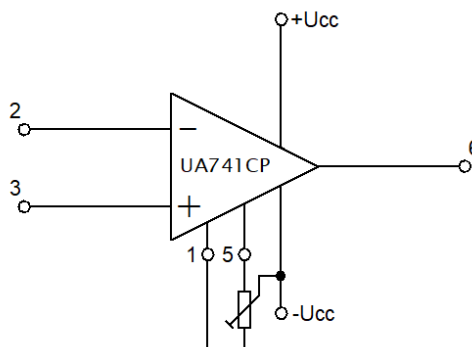
Chyby při násobení se skládají především ze vstupních a výstupních offsetů, chyby měřítka (10 V) a nelinearitami v násobícím jádru. Vstupní a výstupní offset lze eliminovat zapojením na (Obr. 28), také redukuje chyby měřítka (10 V) způsobené chybami sítě a nesnižitelnou nelinearitu v násobícím jádru. Nejčastěji se obvod na (Obr. 28) připojuje k sumačnímu vstupu Z (pin 6).[7]



Obr. 28 Zapojení obvodu kompenzace.[7]

5.5.2 Chyby způsobené OZ

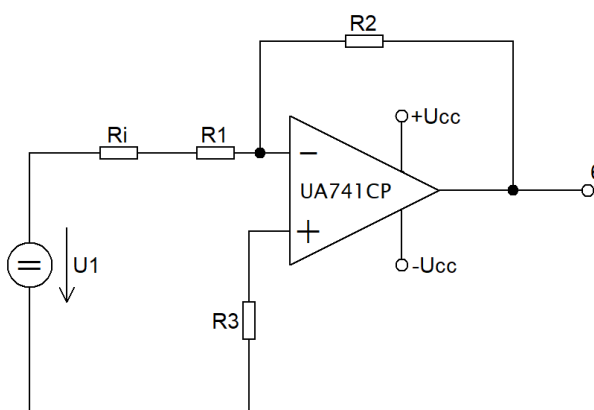
Součástí zapojení děličky (Obr. 21) a odmocniny (Obr. 23) jsou invertující zapojení OZ. Vstupní tranzistory OZ nemají zcela stejné parametry, to je příčinou vzniku vstupní napěťové nesymetrie. To znamená, že na výstupu OZ se nám objeví určité napětí U_{IO} i když napětí mezi oběma vstupy je nulové (offset). **Vstupní napěťová nesymetrie U_{IO}** se tedy rovná napětí, které musíme přivést na vstupní svorky OZ, aby výstupní napětí bylo rovno 0 V.[7]



Obr. 29 Zapojení pro nastavení napěťové nesymetrie vstupů U_{IO} . [7]

Napěťová nesymetrie vstupu není stálá hodnota, protože se mění s časem, teplotou, napájecím napětím. Největší změnu tvoří změna teploty, která se nazývá **teplotní drift napěťové nesymetrie** αU_{I0} . Je-li $\alpha U_{I0} = 10 \mu V/^{\circ}C$ a teplota okolí se změní o $20^{\circ}C$ pak $\alpha U_{I0} = \left(10 \frac{\mu V}{^{\circ}C}\right) \cdot 20^{\circ}C = 200 \mu V = 0,2 mV$. Napětí, které se nám objeví na výstupu OZ, i když vstupní signál je nulový, je způsobeno nejen výše popsanou napěťovou nesymetrií, ale i průchodem tzv. **vstupního klidového proudu** I_{IB0} odporem vstupního zesilovače. Vzniklé napětí na odporu se pak zesilovačem zesílí a objeví na výstupu. Jednoduše řečeno jedná se o proud, který musíme přivést na vstup zesilovače, aby výstupní napětí zesilovače bylo rovno 0 V.

Vstupní proudová nesymetrie I_{IO} je také způsobena vstupními tranzistory OZ které nemají stejné parametry a jejich vstupní proud je tedy rozdílný. Přibližná hodnota vstupní proudové nesymetrie je $I_{IO} = 20 nA$. Nejjednodušší kompenzace vstupních proudů je na (Obr. 30).[7]



Obr. 30 Kompenzace vstupního klidového proudu.[7]

Platí následující rovnice:

$$R_i + R_1 = R_1' \quad (5.67)$$

$$R_3 = \frac{R_1' \cdot R_2}{R_1' + R_2} \quad (5.68)$$

Nevýhodou tohoto zapojení je snížení horního mezního kmitočtu celého zesilovače.

Potlačení změn vlivu napájecího napětí – SVR – při změně U_{cc} se nesmí u ideálního OZ měnit výstupní napětí, u skutečného OZ však ke změně dochází. Tato změna se vyjadřuje buď v mV/V nebo v dB. Změníme-li U_{cc} o 5 V a výstupní napětí se změní o $500 \mu V$ tak $SVR = \frac{500 \mu V}{5V}$ při vyjádření v decibelech $SVR_{dB} = 20 \cdot \log\left(\frac{5V}{500 \cdot 10^{-6}}\right) = 80 dB$. [7]

Všechny zmíněné parametry skutečného OZ můžeme kompenzovat volbou jiného typu OZ.

Tab. 7 Základní parametry skutečných OZ.[8][9][10]

	UA741CP	AD711JN	AD711KN	AD711CN	TL071C
$U_{I0}(mV)$	5	0,3	0,2 ÷ 0,5	0,1 ÷ 0,25	3 ÷ 10
$\alpha U_{I0}(\mu V/^{\circ}C)$	-	7	5 ÷ 10	2 ÷ 5	10
I_{IB0}	100 nA	15 pA ÷ 50 pA	15 pA ÷ 50 pA	15 pA ÷ 25 pA	20 pA ÷ 200 pA
I_{IO}	20 nA	10 pA ÷ 25 pA	5 pA ÷ 25 pA	5 pA ÷ 10 pA	5 pA ÷ 100 pA
SVR (dB)	90	76 ÷ 95	80 ÷ 100	86 ÷ 110	70 ÷ 86

6 PRAKTICKÁ ČÁST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Po domluvě s vedoucím bakalářské práce, jsem vybral tyto aplikace – obvod násobení, kvadrátor, odmocnina s invertujícím zapojením OZ a děličku s invertujícím zapojením OZ. Kvůli nouzovému stavu na území České republiky nebylo možné navržená aplikační zapojení ověřit v laboratorii, proto byl pro simulaci vybrán program OrCAD. Při simulaci v programu OrCAD vzniká chyba offsetem, které mají OZ a IO AD633JN implementovány přímo ve struktuře je to z důvodu, aby se simulace co nejvíce blížila skutečnému laboratornímu měření.

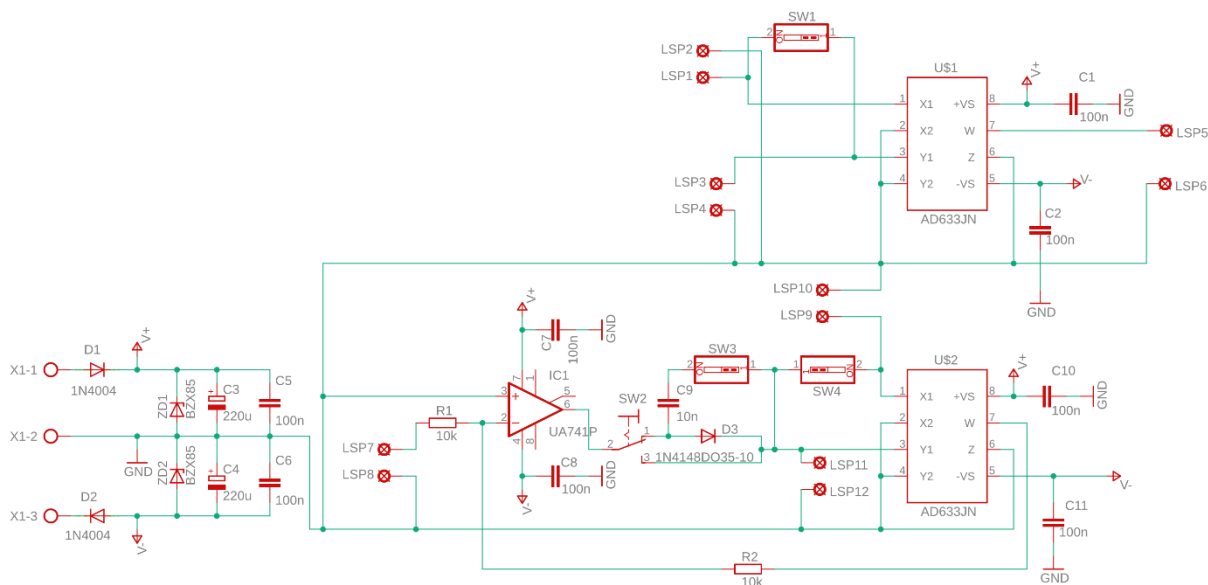
6.1 Návrh praktické realizace

Všechny výše zmíněné aplikace byly realizovány na jedné DPS. Pomocí distančních sloupků a plexiskla jsem výslednou realizaci upravit tak, aby bylo možné jednoduše na ni provádět laboratorní měření.

Ke svorkách označených jako X1-1 a X1-3 jsou sériově připojeny usměrňovací diody, aby nedošlo k přepólování napájecího napětí. Následují dvě ZD, ty jsou zde z důvodu, aby nedošlo k připojení vyššího napětí, než je 15 V. Jelikož je DPS napájena z externího symetrického zdroje a napětí se musí přivést pomocí vodičů, které mají určitou parazitní indukčnost danou délkou vodičů, je třeba použít filtrační a blokovací kondenzátory co nejblíže napájecímu napětí, tak aby bylo napájení DPS stabilní.

Spínač, označený ve schématu jako SW1, slouží pro přepínání mezi obvodem násobením a kvadrátorem, při sepnutí spínače dojde k spojení vstupů X1 a Y1 a tím je vytvořen kvadrátor, když je spínač rozepnutý, jsou i vstupy X1 a Y1 rozepnuté a obvod pracuje jako násobička. Sepnutý spínač SW1 poloha 1 (A.4), rozepnutý spínač SW1 poloha 2 (A.4).

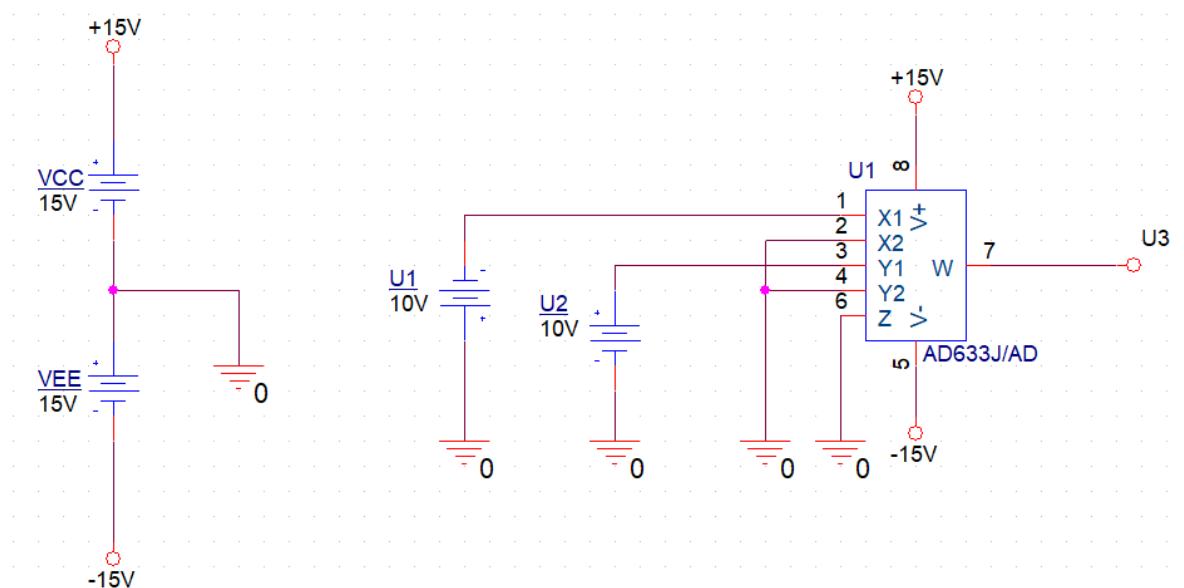
Spínače SW2, SW3 a SW4 slouží pro přepínání mezi odmocninou s invertujícím zapojením OZ a děličkou s invertujícím zapojením OZ. Když spínač označený jako SW2 bude v poloze 3 (A.4) a spínače označené jako SW3 a SW4 budou rozepnuty tedy v poloze 1 (A.4), tak obvod bude pracovat jako dělička invertujícím zapojením OZ. Když bude spínač SW2 v poloze 1 (A.4) a spínače SW3 a SW4 budou v poloze 2 (A.4), tak obvod bude pracovat jako odmocnina s invertujícím zapojením OZ.



Obr. 31 Schéma zapojení obvodu násobení, kvadrátoru, odmocniny s invertujícím zapojením OZ a děličky s invertujícím zapojením OZ.

6.2 Ověření správné činnosti navržených aplikačních zapojení

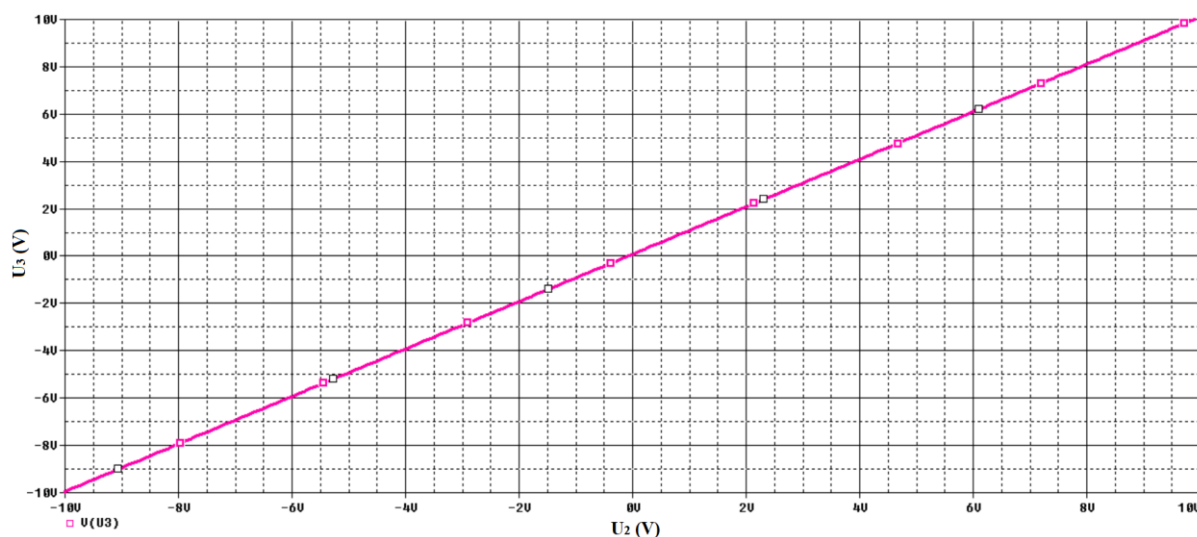
6.2.1 Převodní charakteristiku obvodu násobení $U_3 = f(U_2)$.



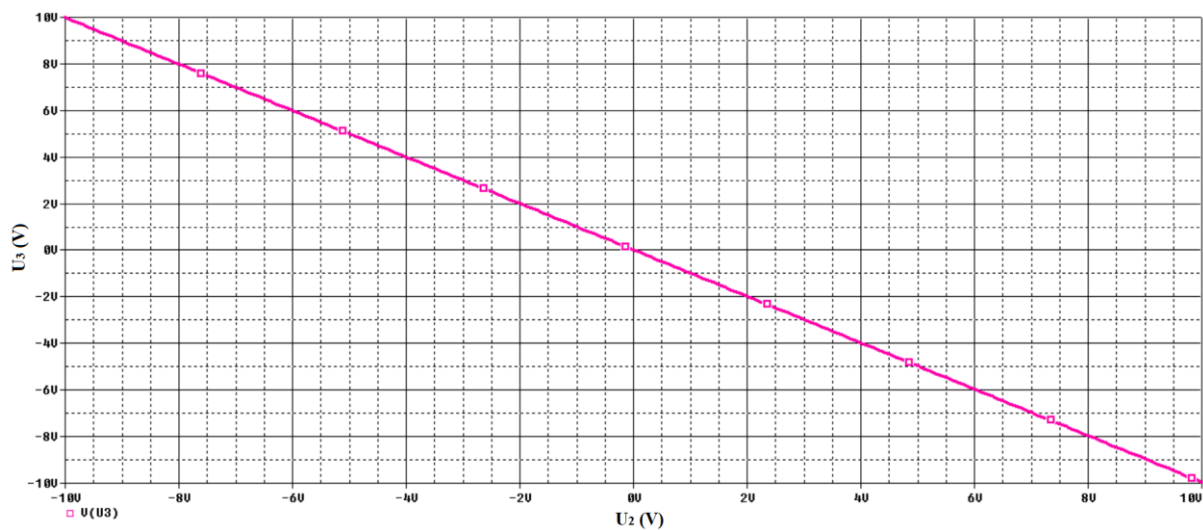
Obr. 32 Zapojení IO AD633JN ve funkci násobení v programu OrCAD.

Přenosová funkce obvodu násobení:

$$U_3 = \frac{U_1 \cdot U_2}{10 \text{ V}} \quad (6.1)$$

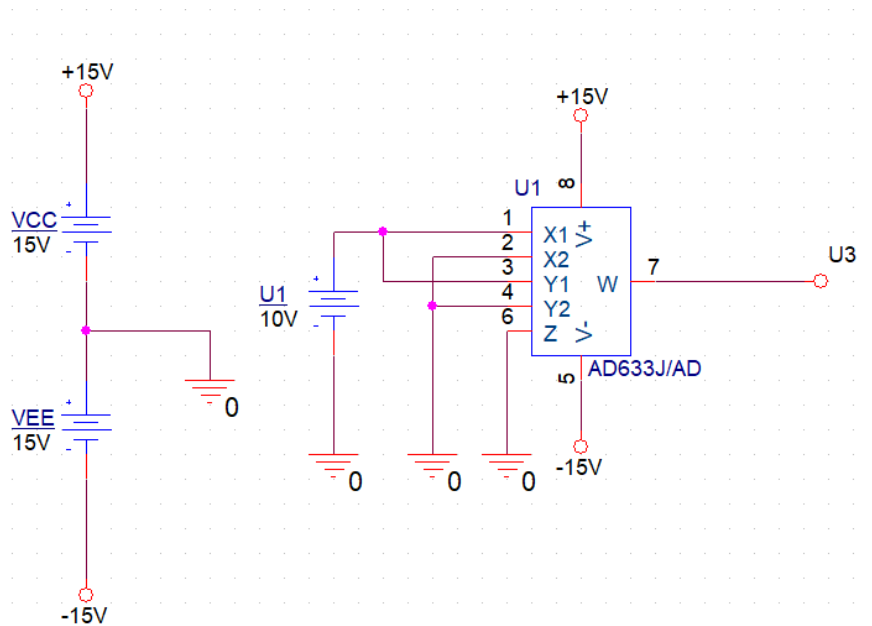


Obr. 33 Převodní charakteristika obvodu násobení, při $U_1 = 10 \text{ V}$ a $U_2 = \pm 10 \text{ V}$.



Obr. 34 Převodní charakteristika obvodu násobení, při $U_1 = -10 \text{ V}$ a $U_2 = \pm 10 \text{ V}$.

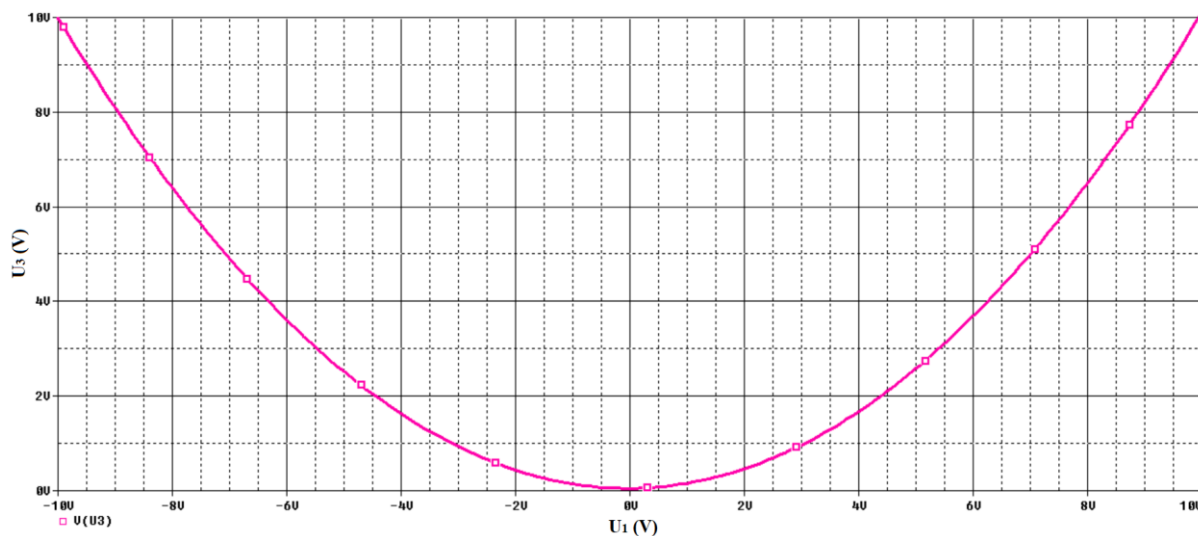
6.2.2 Převodní charakteristiku kvadrátoru $U_3 = f(U_1)$.



Obr. 35 Zapojení IO AD633JN ve funkci kvadrátu v programu OrCAD.

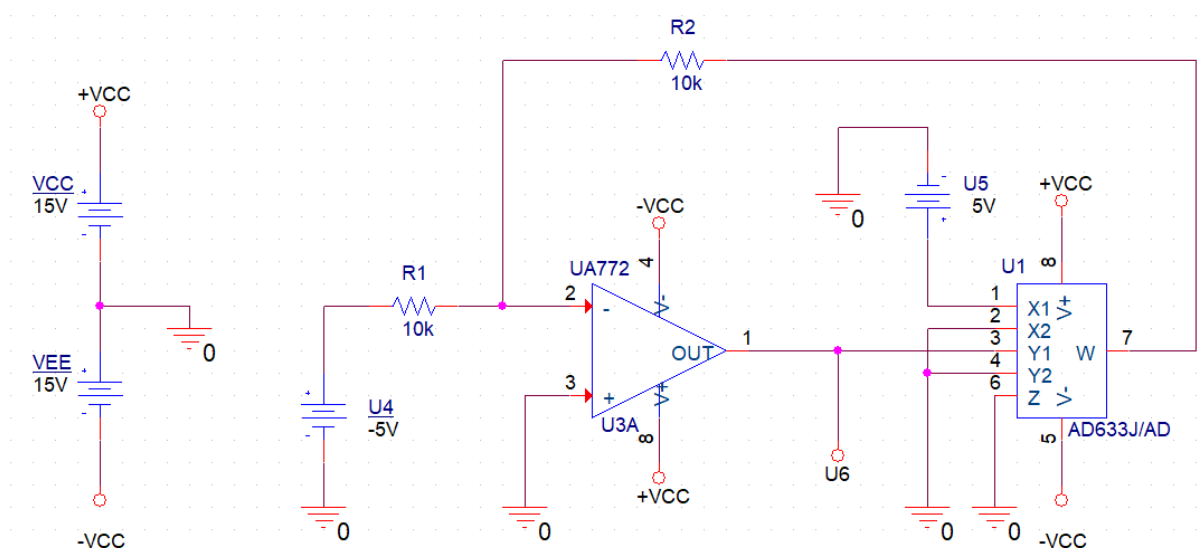
Přenosová funkce kvadrátoru:

$$U_3 = \frac{(U_1)^2}{10 \text{ V}} \quad (6.2)$$



Obr. 36 Převodní charakteristika kvadrátoru, při $U_1 = \pm 10 \text{ V}$ a $U_2 = 10 \text{ V}$.

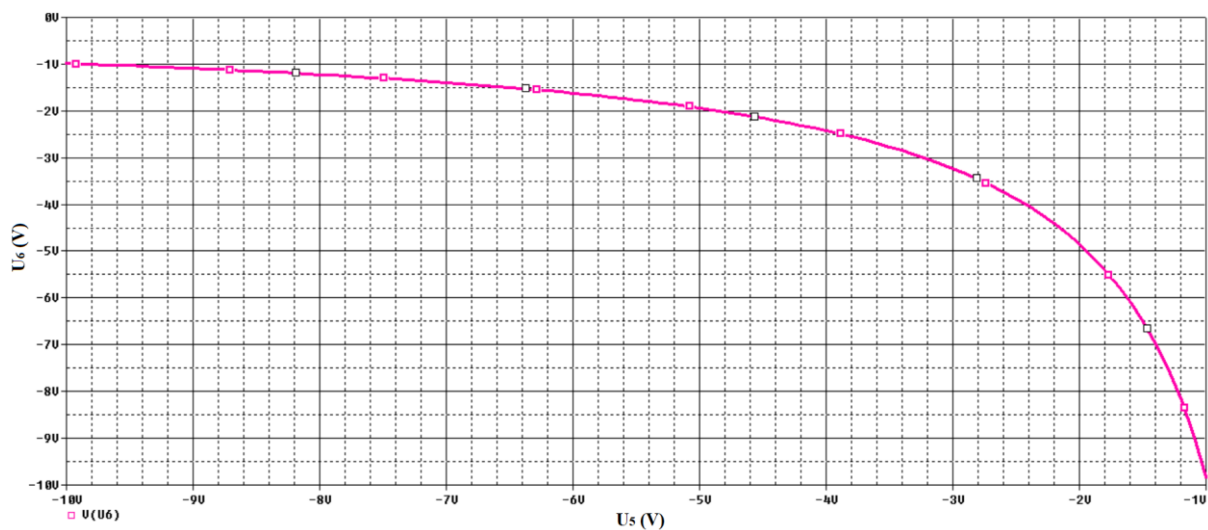
6.2.3 Převodní charakteristika děličky s invertujícím zapojením OZ $U_6 = f(U_5)$.



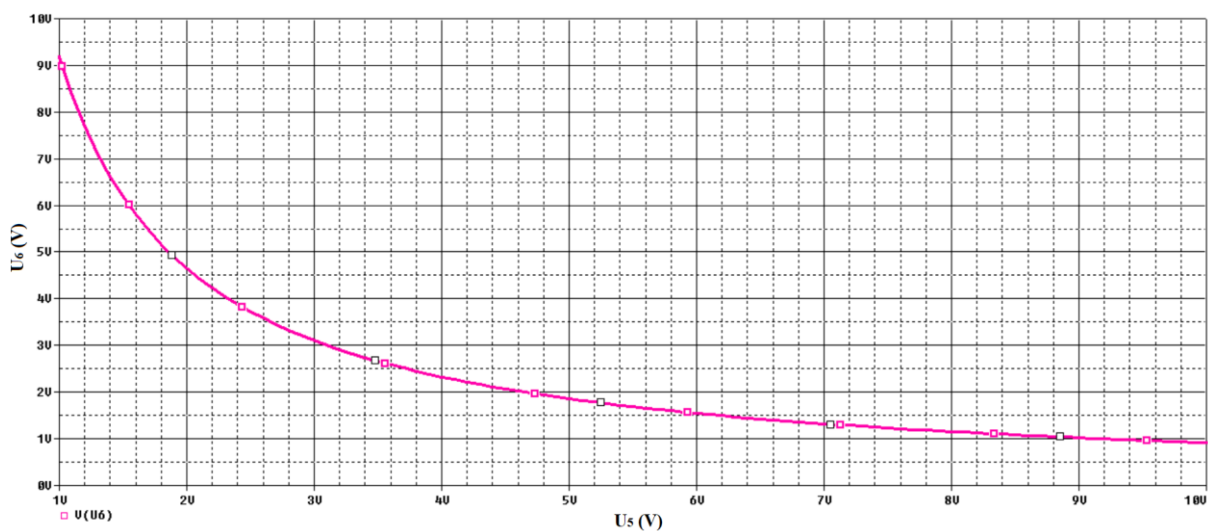
Obr. 37 Zapojení IO AD633JN ve funkci děličky v programu OrCAD.

Přenosová funkce obvodu dělení:

$$U_6 = -10 \text{ V} \cdot \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{U_4}{U_5} \quad (6.3)$$

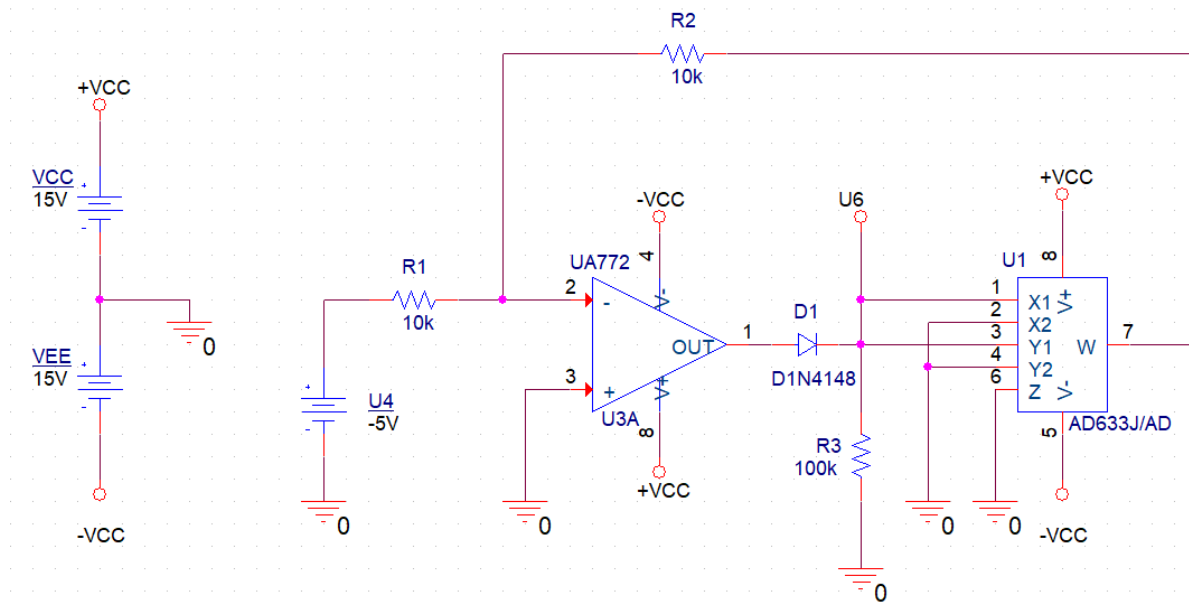


Obr. 38 Převodní charakteristika děličky s invertujícím zapojením OZ, při $U_4 = -1\text{ V}$, $U_5 = (-10\text{ V}) \div (-1\text{ V})$.



Obr. 39 Převodní charakteristika děličky s invertujícím zapojením OZ, při $U_4 = -1\text{ V}$, $U_5 = 1\text{ V} \div 10\text{ V}$.

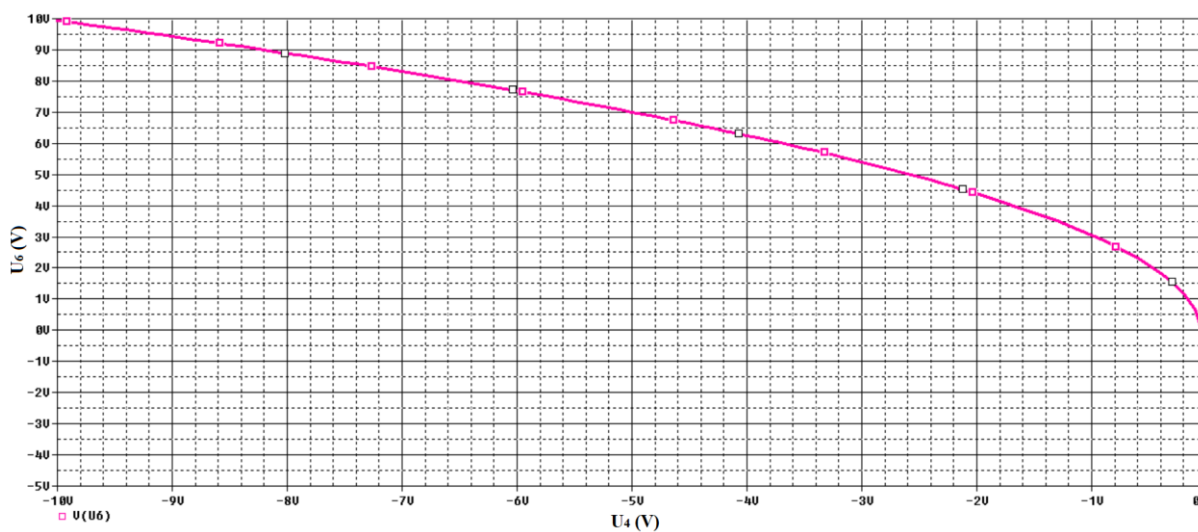
6.2.4 Převodní charakteristika odmocniny s invertujícím zapojením OZ $U_6 = f(U_4)$.



Obr. 40 Zapojení IO AD633JN ve funkci odmocniny v programu OrCAD.

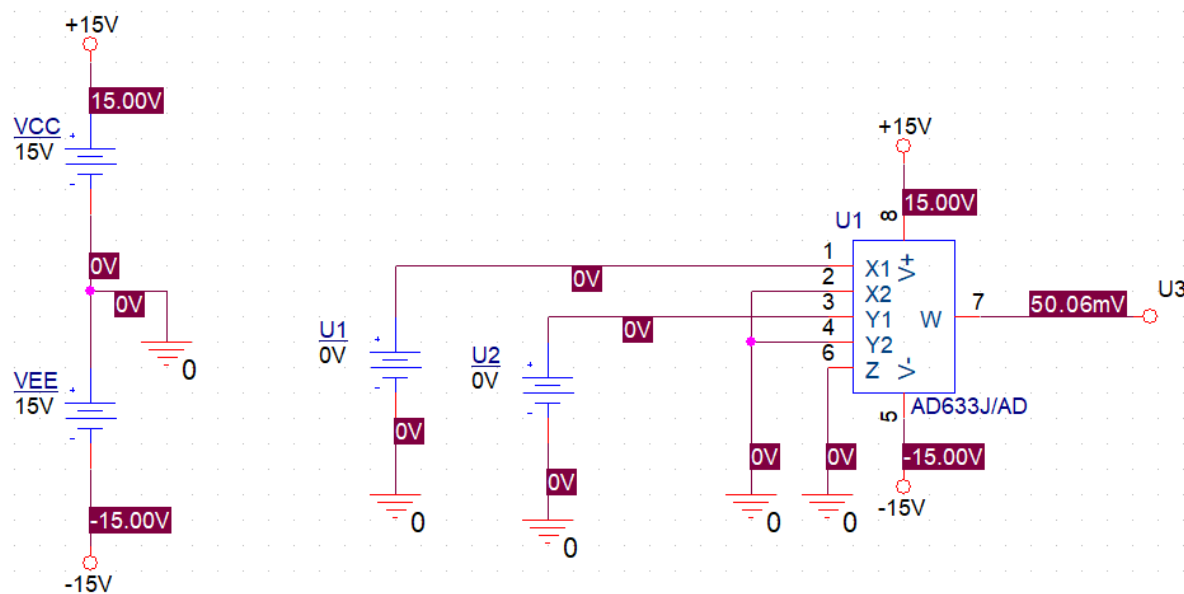
Přenosová funkce odmocniny:

$$U_6 = \sqrt{-10 V \cdot U_4 \cdot \frac{R_2}{R_1}} \quad (6.4)$$



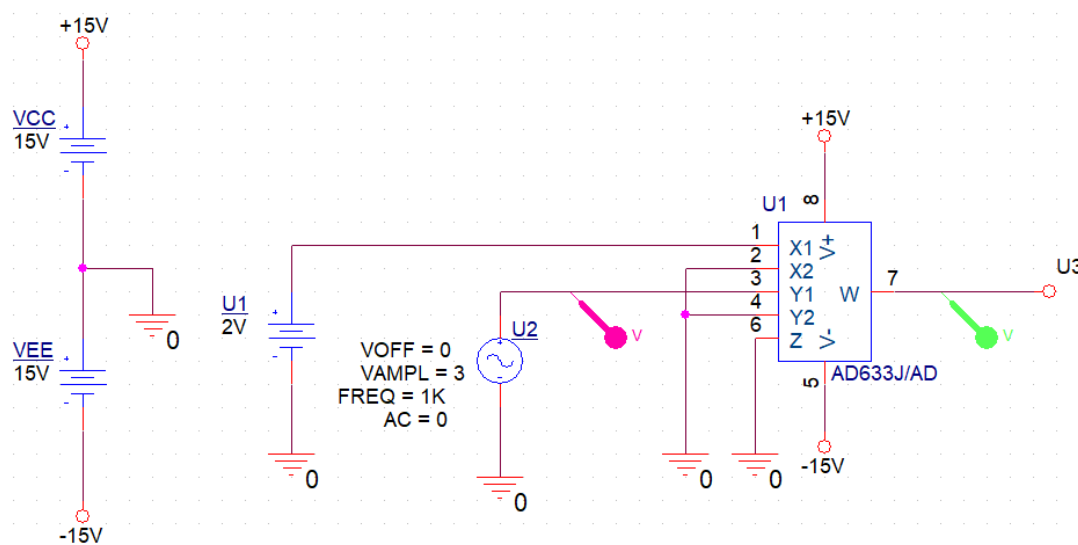
Obr. 41 Převodní charakteristika odmocniny s invertujícím zapojením OZ, při $U_4 = (-10 V) \div (0 V)$.

6.2.5 Změřené výstupní zbytkové napětí násobičky U_3 při $U_1 = U_2 = 0 \text{ V}$.



Obr. 42 Schéma pro změření výstupního zbytkového napětí U_3 , při $U_1 = U_2 = 0 \text{ V}$.

6.2.6 Změřený fázový posun mezi vstupním a výstupním napětím.

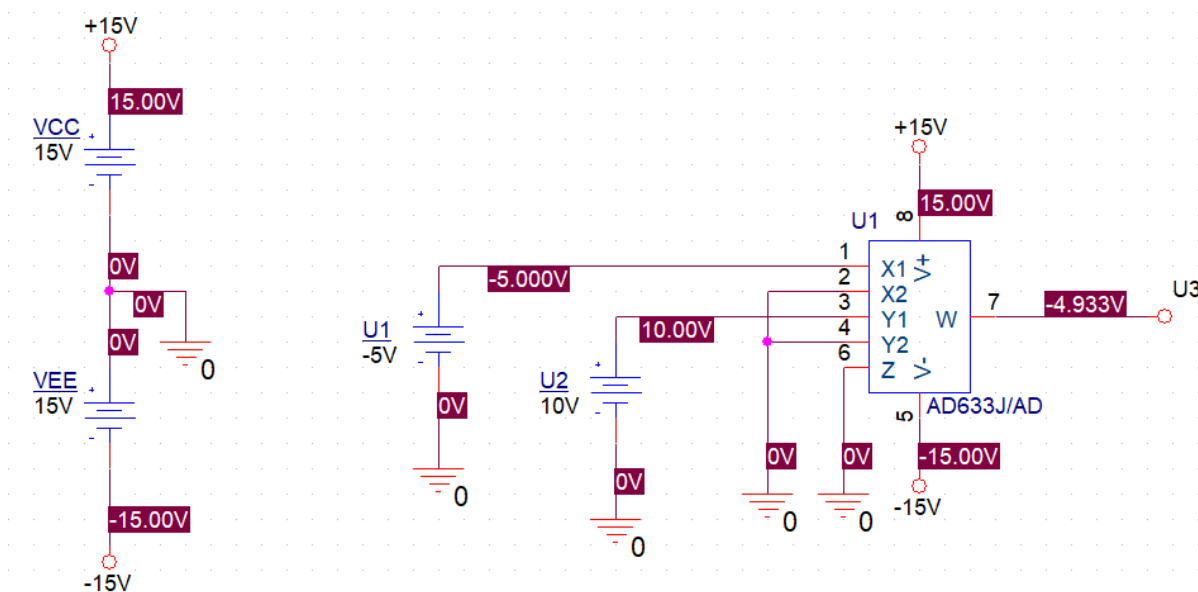


Obr. 43 Schéma pro určení fázového posunu mezi vstupním a výstupním napětím.

Tab. 8 Změřených fázových posunů při různých frekvencích.

f (KHz)	φ (°)
1	0
10	0,62
100	4,54
150	6,90

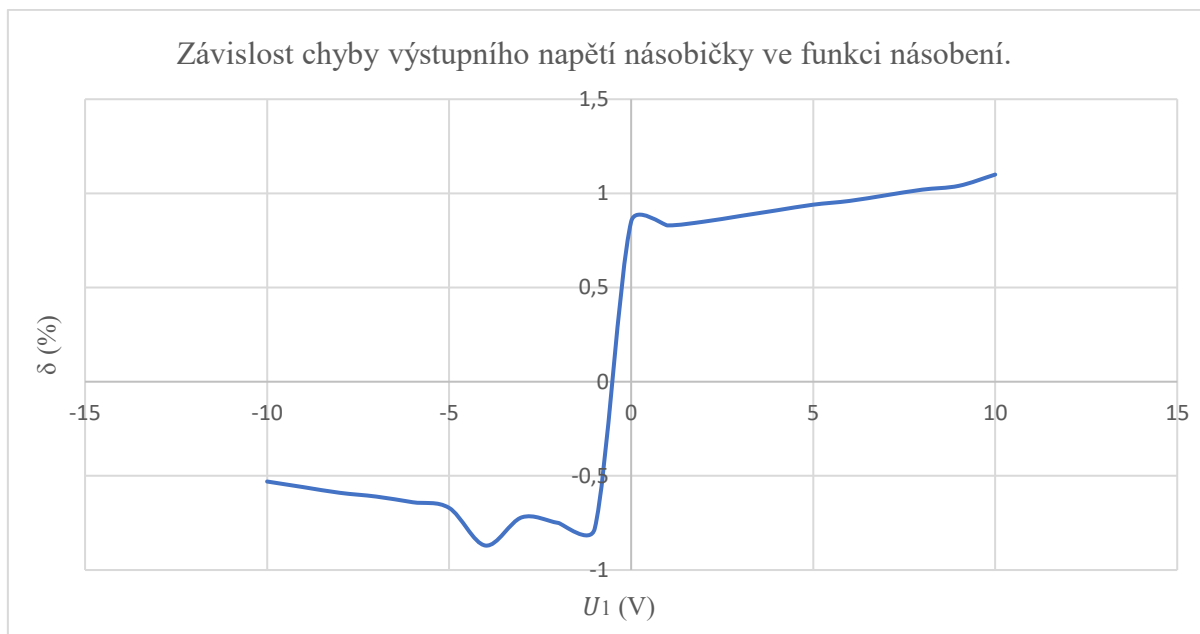
6.2.7 Změřená odchylka při násobení výstupního napětí U_3 od vypočteného výstupního napětí U_{3vyp} v procentech, při $U_1 = \pm 10\text{ V}$ a $U_2 = 10\text{ V}$. Vykreslená charakteristika $\delta = f(U_1)$.



Obr. 44 Schéma pro určení odchylky při násobení.

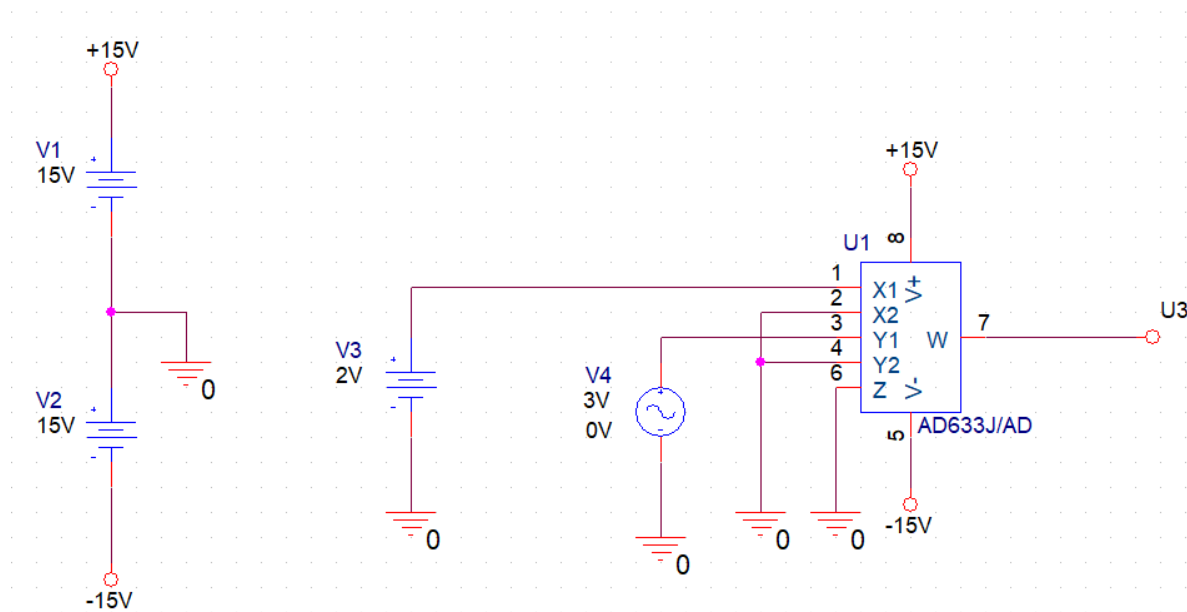
Tab. 9 Nasimulované hodnoty vstupních a výstupních napětí a určení odchylky.

U_1 (V)	U_2 (V)	U_3 (V)	U_{3vyp} (V)	δ (%)
-10	10	-9,947	-10	-0,53
-9	10	-8,944	-9	-0,62
-8	10	-7,941	-8	-0,59
-7	10	-6,939	-7	-0,61
-6	10	-5,936	-6	-0,64
-5	10	-4,933	-5	-0,67
-4	10	-3,913	-4	-0,87
-3	10	-2,928	-3	-0,72
-2	10	-1,925	-2	-0,75
-1	10	-0,922	-1	-0,78
0	10	0,085	0	0,85
1	10	1,083	1	0,83
2	10	2,085	2	0,85
3	10	3,088	3	0,88
4	10	4,091	4	0,91
5	10	5,094	5	0,94
6	10	6,096	6	0,96
7	10	7,099	7	0,99
8	10	8,102	8	1,02
9	10	9,104	9	1,04
10	10	10,11	10	1,1

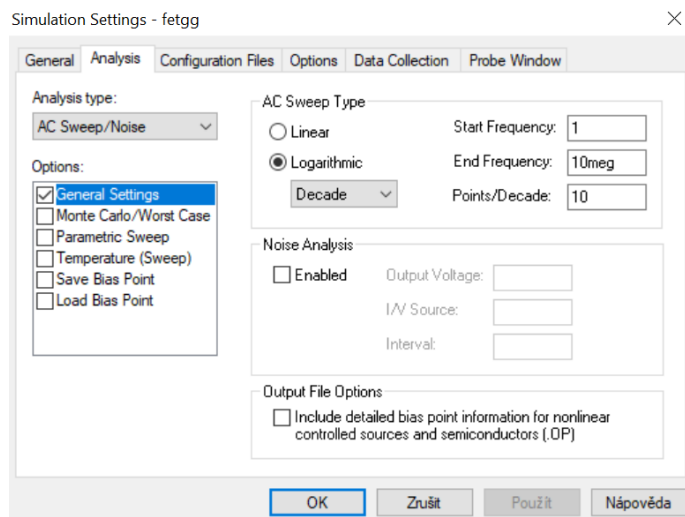


Obr. 45 Závislost chyby výstupního napětí násobičky ve funkci násobení.

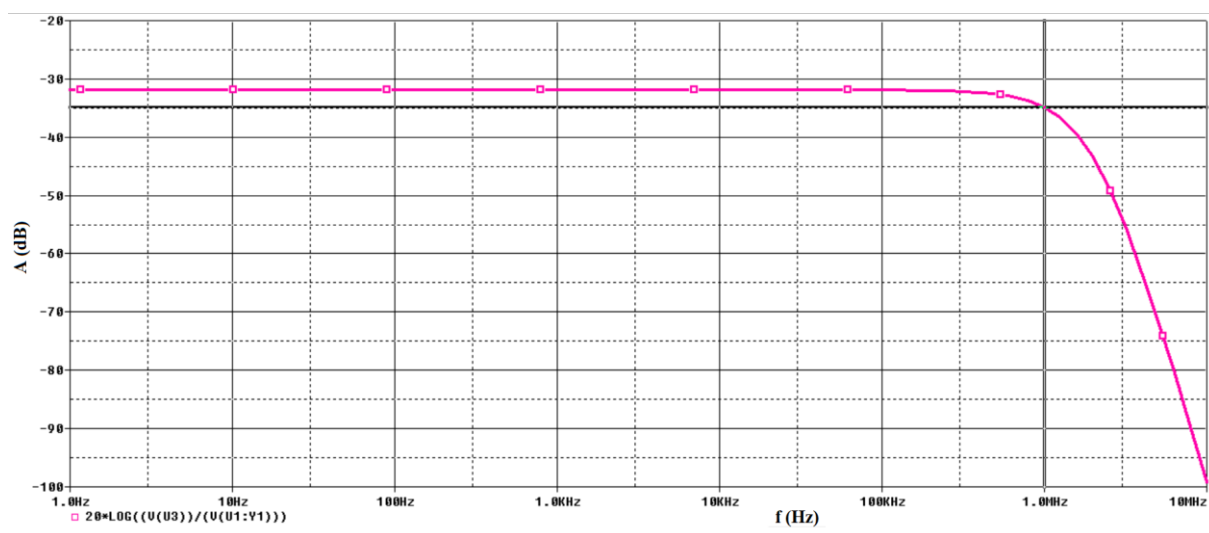
6.2.8 Frekvenční charakteristiky – amplitudová a fázová



Obr. 46 Schéma pro simulaci frekvenčních charakteristik.

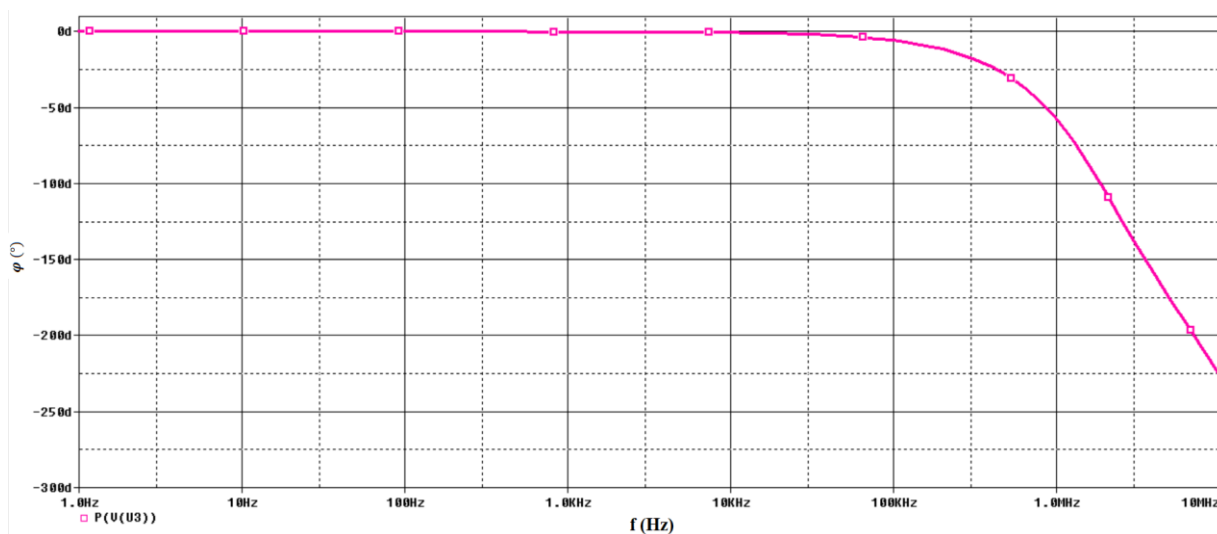


Obr. 47 Nastavení simulace pro amplitudovou a fázovou frekvenční charakteristiku.



Obr. 48 Amplitudová frekvenční charakteristika.

$$B = f_H - f_D = 1 \cdot 10^6 - 1 = 999\,999 \text{ Hz} = 999 \text{ KHz} \quad (6.5)$$



Obr. 49 Fázová frekvenční charakteristika.

7 Závěr

Stručně jsem popsal způsoby násobení analogových signálů. Nejvíce jsem se zaměřil na metodu s rozdělením proudu v obvodu, protože v dalších částech bakalářské práce se budu o této metodě dále zmiňovat.

V (Tab. 2) je výčet základních vlastností analogových násobiček ve formě IO, všechny zmíněné IO vyrábí firma Analog Devices. Inf.

Pro praktickou realizaci aplikací jsem vybral IO AD633JN, protože jednoduchou úpravou přenosové funkce jsem dostal výsledné přenosové funkce jednotlivých funkcí (násobení, kvadrát, dělení, odmocnina).

Obvod dělení a odmocnina obsahují operační zesilovače, proto jsem zmínil chyby, které operační zesilovače způsobují a jak se dají snížit, popřípadě odstranit.

V simulačním programu OrCad byly ověřeny převodní charakteristiky jednotlivých aplikací. Jedinou aplikací, která pracuje ve všech čtyřech kvadrantech je obvod násobení. Kvadrátor a dělička s invertujícím zapojením OZ pracují pouze ve dvou kvadrantech a odmocnina s invertujícím OZ pracuje pouze v jednom kvadrantu. Převodní charakteristiky jednotlivých aplikací jsou na (Obr. 33), (Obr. 34), (Obr. 36), (Obr. 38), (Obr. 39) a (Obr. 41).

Při ověřování funkčnosti jednotlivých aplikací v programu OrCAD jsem zjistil, že při $U_1 = U_2 = 0V$ není na výstupu předpokládané napětí $U_3 = 0V$, ale napětí $U_3 = 50,06 mV$. Tato odchylka je způsobená modelem IO AD633JN, je to z důvodu, aby se model v programu OrCADu co nejvíce přibližoval skutečnému IO.

Dále jsem zjišťoval fázový posun mezi vstupem a výstupem analogové násobičky, při nízkých frekvencích je fázový posun téměř roven 0° , při frekvencích okolo 100 KHz je fázový posun vyšší než 4° viz. (Tab. 8).

Na (Obr. 45) je charakteristika odchylky při násobení změřeného výstupního napětí U_3 od vypočteného výstupního napětí U_{3vyp} v procentech. Poslední simulaci, kterou jsem provedl je amplitudová a fázová frekvenční charakteristika, na (Obr. 47) je nastavení simulace v programu OrCAD. Výsledné charakteristiky jsou na (Obr. 48) a (Obr. 49).

8 Literatura

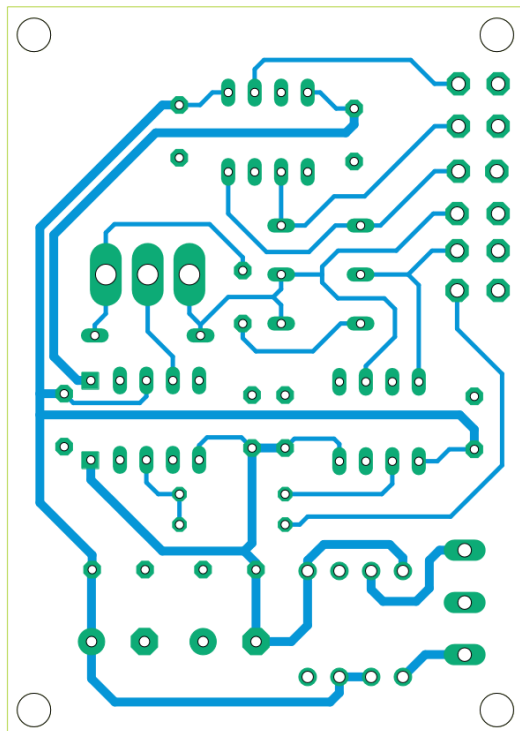
- [1] **Brandštetter, Pavel.** Analogové elektronické obvody. *Učební texty pro kombinované a distanční studium.* VŠB-TU Ostrava, ©2005.
- [2] **MT-079: Analog multipliers.** *www.analog.com.* Analog devices,, ©2009. [Citace: 04. 03 2020.] <https://www.analog.com/media/en/training-seminars/tutorials/MT-079.pdf>.
- [3] **Analog Devices, Inc.** *Datasheet AD633.* [Citace: 29. 03. 2020.] <https://www.alldatasheet.com/>.
- [4] **Analog Devices, Inc.** *Datasheet AD734.* [Citace: 29. 03. 2020.] <https://www.alldatasheet.com/>.
- [5] **Analog Devices, Inc.** *Datasheet AD834.* [Citace: 29. 03. 2020.] <http://www.alldatasheet.com/>.
- [6] **Analog Devices, Inc.** *Datasheet AD835.* [Citace: 29. 03. 2020.] <http://www.alldatasheet.com/>.
- [7] **Miloslav, Bezděk.** *Elektronika 1.* České Budějovice : KOPP, 2005. 80-7232-171-4.
- [8] **Texas Instruments.** *datasheet UA741CP.* 1970. [Citace: 07. 04. 2020.] <https://html.alldatasheet.com/html-pdf/543324/TI/UA741CP/24/1/UA741CP.html>.
- [9] **Analog Devices, Inc.** *Datasheet AD711.* [Citace: 01. 05. 2020.] <https://www.alldatasheet.com/>.
- [10] **Texas Instruments.** *Datasheet TL071C.* [Citace: 01. 05. 2020.] <https://www.alldatasheet.com/>.
- [11] **Brandštetter, Pavel.** Technické prostředky pro řízení elektrických pohonů. *Učební texty pro kombinované a distanční studium.* VŠB-TU Ostrava, ©2005.

9 SEZNAM PŘÍLOH

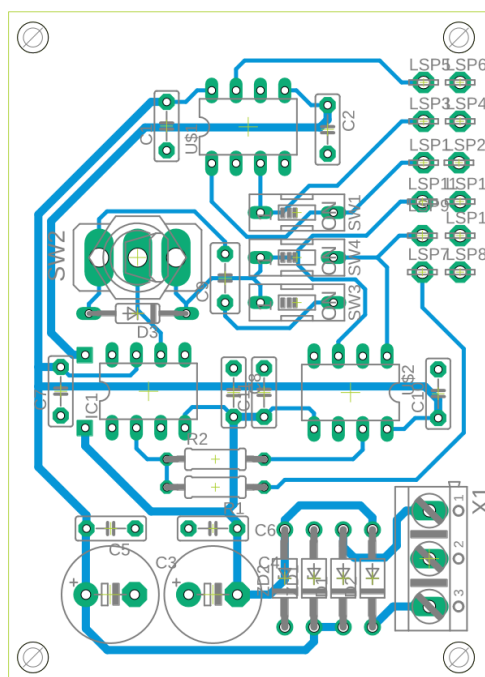
A	DESKA SDRUŽUJÍCÍ VÍCE APLIKACÍ	47
A.1	DPS	47
A.2	DPS S ROZMÍSTĚNÝMI SOUČÁSTKAMI	47
A.3	SEZNAM SOUČÁSTEK	48
A.4	FOTODOKUMENTACE	49
B	SYLABY K REALIZOVANÝM ZAPOJENÍM	50
B.1	ZADÁNÍ LABORATORNÍ ÚLOHY	50
B.2	TEORETICKÝ ROZBOR	50
B.3	BLOKOVÁ SCHÉMATA APLIKACÍ	51
B.4	POSTUP MĚŘENÍ JEDNOTLIVÝCH BODŮ ZADÁNÍ.....	52

A Deska sdružující více aplikací

A.1 DPS



A.2 DPS s rozmístěnými součástkami

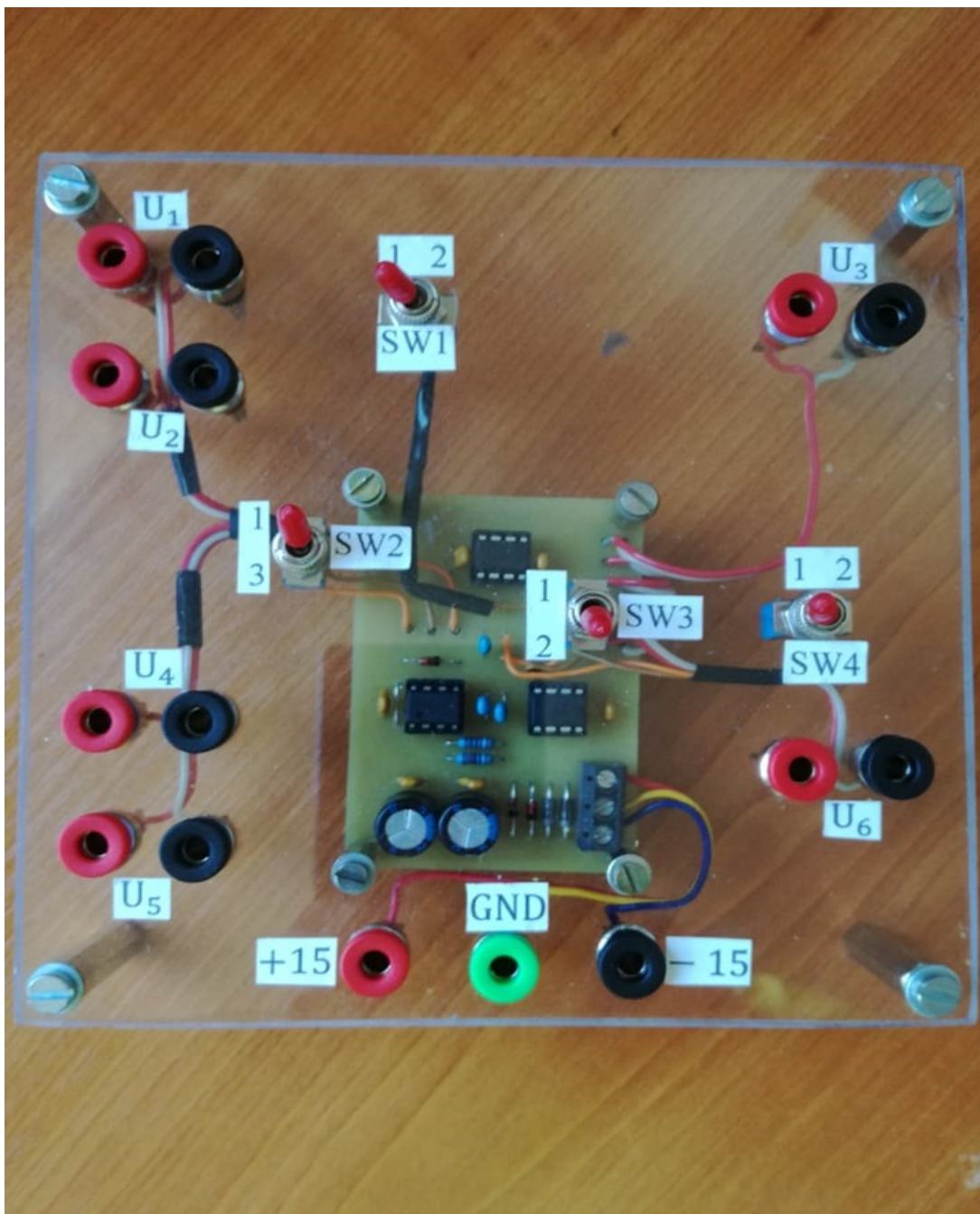


A.3 Seznam součástek

Název	Hodnota	Typ	Pouzdro
C1	100 nF	Keramický RM5-08	RM5-08
C2	100 nF	Keramický RM5-08	RM5-08
C3	220 μ F	Elektrolytický RM5 - BULK	RM5 - BULK
C4	220 μ F	Elektrolytický RM5 - BULK	RM5 - BULK
C5	100 nF	Keramický RM5-08	RM5-08
C6	100 nF	Keramický RM5-08	RM5-08
C7	100 nF	Keramický RM5-08	RM5-08
C8	100 nF	Keramický RM5-08	RM5-08
C9	10 nF	Keramický RM5-08	RM5-08
C10	100 nF	Keramický RM5-08	RM5-08
C11	100 nF	Keramický RM5-08	RM5-08
D1	1N4004	1N4004	D041
D2	1N4004	1N4004	D041
D3	1N4148	1N4148	DO35
IC1		UA741P	DIP8
LSP1	U1	Zdířka panelová červená	24.241.1
LSP2	GND	Zdířka panelová černá	24.241.2
LSP3	U2	Zdířka panelová červená	24.241.1
LSP4	GND	Zdířka panelová černá	24.241.2
LSP5	U3	Zdířka panelová červená	24.241.1
LSP6	GND	Zdířka panelová černá	24.241.2
LSP7	U4	Zdířka panelová červená	24.241.1
LSP8	GND	Zdířka panelová černá	24.241.2
LSP9	U5	Zdířka panelová červená	24.241.1
LSP10	GND	Zdířka panelová černá	24.241.2
LSP11	U6	Zdířka panelová červená	24.241.1
LSP12	GND	Zdířka panelová černá	24.241.2
R1	10 K Ω	Metalizovaný rezistor	RM - 0207
R2	10 K Ω	Metalizovaný rezistor	RM - 0207
SW1	-	P-KNX1	P-KNX1
SW2	-	P-KNX1	P-KNX1
SW3	-	P-KNX1	P-KNX1
SW4	-	P-KNX1	P-KNX1
U\$1	-	AD633JN	DIP8
U\$2	-	AD633JN	DIP8
V+	+15 V	Zdířka panelová červená	24.241.1
V-	-15 V	Zdířka panelová černá	24.241.2
GND	0 V	Zdířka panelová zelená	24.241.4
X1		Svorkovnice	AK550/3DS-3,5V
ZD1	BZX85	BZX85	DO41

ZD2	BZX85	BZX85	DO41
-----	-------	-------	------

A.4 Fotodokumentace



B Sylaby k realizovaným zapojením

B.1 Zadání laboratorní úlohy

1. Změřte výstupní zbytkové napětí násobičky U_3 při $U_1 = U_2 = 0 V$.
2. Určete odchylku změřeného výstupního napětí U_3 od vypočteného výstupního napětí U_{3vyp} v procentech při $U_1 = \pm 10 V$ a $U_2 = 10 V$ a vykreslete charakteristiku $\delta = f(U_1)$.
3. Změřte fázový posun mezi vstupním napětím U_2 a výstupním napětím U_3 , pro kmitočty $f = 1 KHz, 10 KHz, 100 KHz, 150 KHz$.
4. **Násobení** – Změřte převodní charakteristiku $U_3 = f(U_2)$, při $U_1 = 10 V$ a $U_2 = \pm 10 V$ a při $U_1 = -10 V$ a $U_2 = \pm 10 V$.
5. **Kvadrát** – Změřte převodní charakteristiku $U_3 = f(U_1)$, $U_1 = \pm 10 V$.
6. **Dělička** – Změřte převodní charakteristiku $U_6 = f(U_5)$, při $U_5 = \pm 10 V$ a $U_4 = -1 V$.
7. **Odmocnina** – Změřte převodní charakteristiku $U_6 = f(U_4)$, $U_4 = -10 V \div 0 V$.

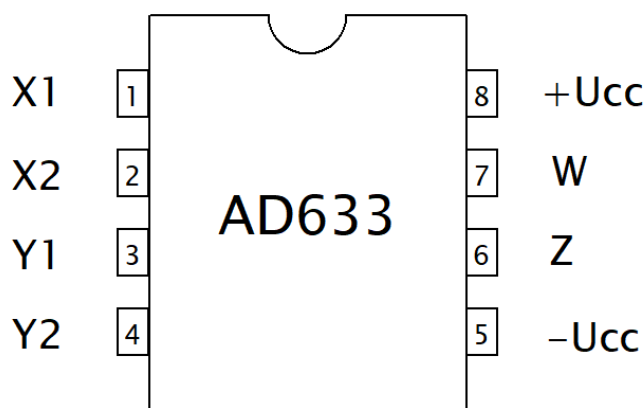
B.2 Teoretický rozbor

Aplikace byly realizovány s IO AD633JN, tento IO pracuje na principu rozdělení proudu v obvodu. AD633JN je čtyřkvadrantová analogová násobička, tzn. každý vstup může pracovat v obou polaritách. IO AD633JN realizuje funkci:

$$W = \frac{(X_1 - X_2) \cdot (Y_1 - Y_2)}{10 V} + Z$$

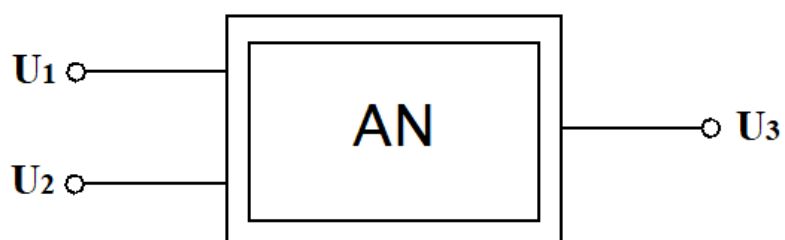
Kde

- X_1, X_2, Y_1, Y_2 jsou vstupní napětí, jejichž rozsah je $\pm 10 V$ při napájecím napětí $\pm 15 V$.
- Z je sumační vstup

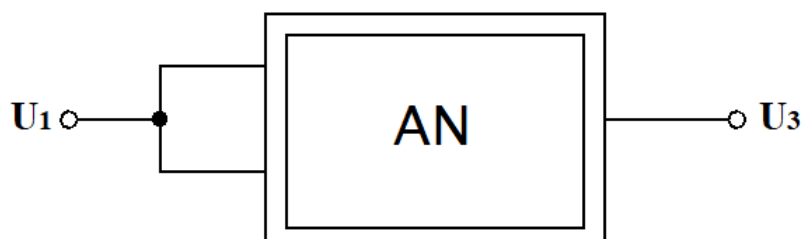


Obr. 50 AD633JN v pouzdře DIP.

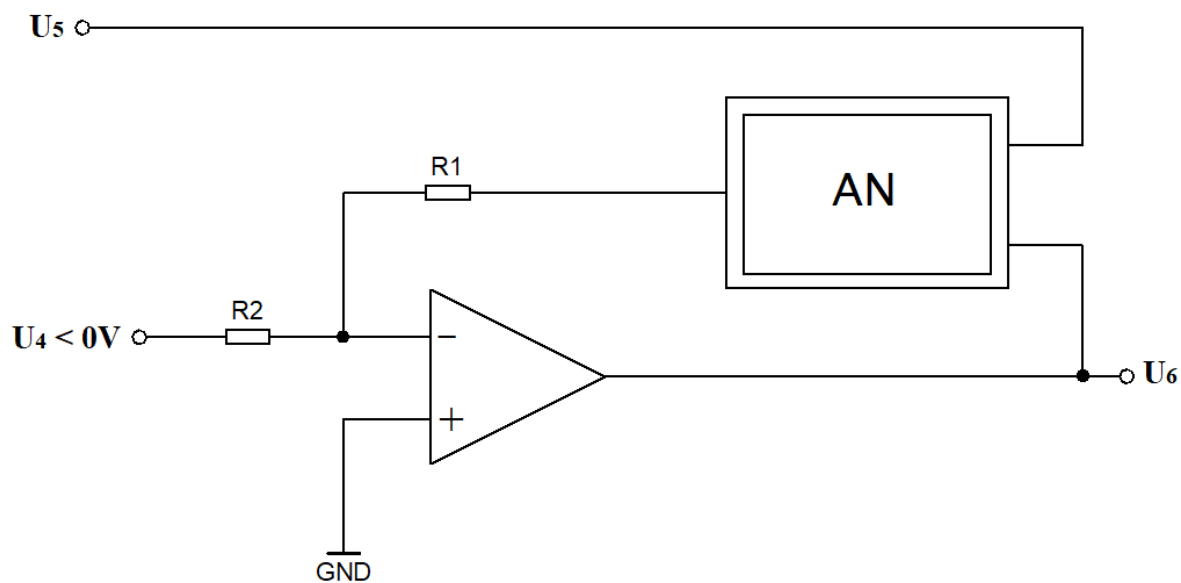
B.3 Bloková schémata aplikací



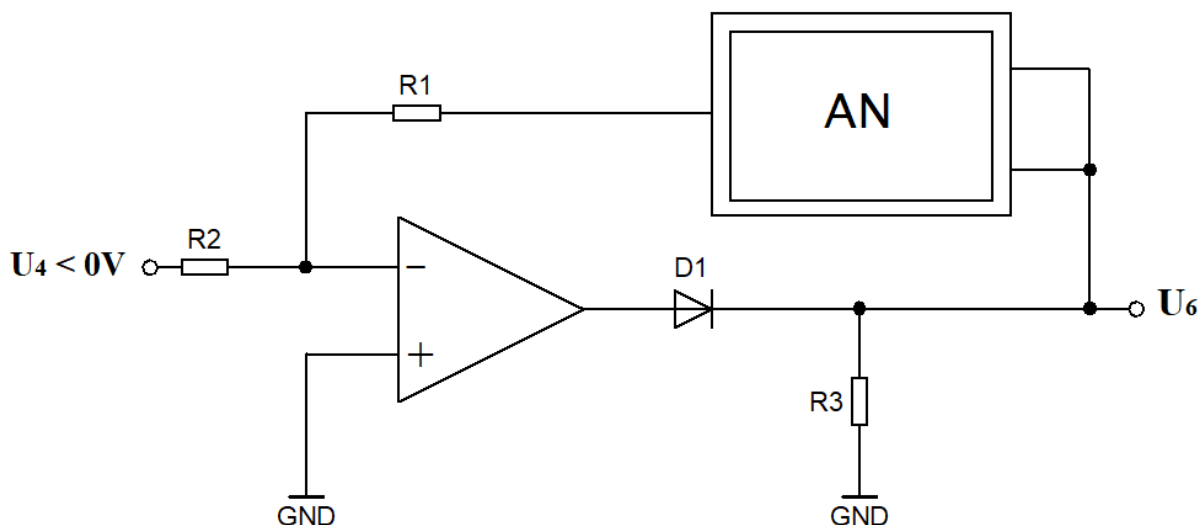
Obr. 51 Blokové schéma obvodu násobení.



Obr. 52 Blokové schéma kvadrátoru.



Obr. 53 Blokové schéma obvodu dělení.



Obr. 54 Blokové schéma odmocniny.

B.4 Postup měření jednotlivých bodů zadání

1. Na zdířky označené jako +15, -15, GND připojte symetrický zdroj napětí ± 15 V, GND. Následně připojte voltmetr ke zdírkám označeným jako U_3 (černá svorka – GND, červená svorka – napěťový výstup W z AD663JN). Páčkový spínač označen jako SW1 v poloze 2.
2. Páčkový spínač označený jako SW1 v poloze 2. Ke zdírkám označeným jako U_1 a U_2 připojte zdroje stejnosměrných napětí (černá svorka – GND, červená svorka – je pro U_1 vstup X1 a pro U_2 vstup Y1), na zdroji připojeném ke zdírkám U_1 měňte hodnoty napětí v rozmezí ± 10 V, na zdroji připojeném ke zdírkám U_2 nastavte trvale 10 V. Dále připojte voltmetr ke zdírkám označeným jako U_3 , vypočtené výstupní napětí určete z přenosové funkce $U_{3vyp} = \frac{U_1 \cdot U_2}{10V}$.
3. Páčkový spínač označený jako SW1 v poloze 2. Ke zdírce označené jako U_1 připojte stejnosměrný zdroj napětí ke zdírce označené jako U_2 připojte zdroj střídavého napětí. Na zdířky U_2 a U_3 připojte osciloskop a měřte fázový posun mezi vstupním a výstupním napětím pro kmitočty $f = 1$ KHz, 10 KHz, 100 KHz, 150 KHz.
4. **Násobení** – Páčkový spínač označený jako SW1 v poloze 2. Ke zdírkám označeným jako U_1 a U_2 připojte zdroje stejnosměrných napětí (černá svorka – GND, červená svorka – je pro U_1 vstup X1 a pro U_2 vstup Y1), na zdroji připojeném ke zdírkám U_1 nastavte hodnotu 10 V, na zdroji připojeném ke zdírkám U_2 měňte hodnoty napětí v rozmezí ± 10 V. Poté změňte hodnotu na zdroji připojeného ke zdírkám U_1 z 10 V na -10 V a na druhém zdroji nastavujte napětí v rozmezí ± 10 V.
5. **Kvadrátor** – Páčkový spínač označen jako SW1 v poloze 1. Ke zdírce označené jako U_1 připojte zdroj stejnosměrného napětí (černá svorka – GND, červená svorka – je pro U_1 vstup X1) na zdroji připojeném ke zdírkám U_1 měňte hodnoty napětí v rozmezí ± 10 V. Ke zdírkám označeným jako U_3 připojte voltmetr a měřte výstupní napětí.
6. **Dělička** – Páčkový spínač označený jako SW2 v poloze 3 a spínače označený jako SW3 a SW4 v poloze 1, tak obvod bude pracovat jako dělička. Na zdířky označené jako U_4 a U_5 připojte zdroj stejnosměrného napětí. Na zdroji připojeném ke zdírkám U_4 nastavte napětí < 0 V (doporučuji -1 V), a na zdroj připojený ke zdírkám U_5 měňte hodnoty napětí v rozmezí ± 10 V. Na zdírkách označených jako U_6 připojte voltmetr a měřte výstupní napětí.

- 7. Odmocnina** – Páčkový spínač označený jako SW2 v poloze 1 a spínače označeny jako SW3 a SW4 v poloze 2, tak obvod bude pracovat jako odmocnina. Na zdířky označené jako U_4 připojte zdroj stejnosměrného napětí. Na zdroji připojeném ke zdířkám U_4 měňte hodnoty napětí od -10 V do 0 V. Na zdířkách označených jako U_6 připojte voltmetr a měřte výstupní napětí.